



**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2021
№8**



RIGOL

Possibilities and More

Цифровой осциллограф DS8000-R серия

2 устройства в стандартной стойке высотой 1U

Возможность получения
до **512** измерительных
каналов



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

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

На правах рекламы

О компании RIGOL Technologies:

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

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

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



ООО ТД "ЮНИТ СЕРВИС"

Телефоны:

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

адрес электронной почты:

tdus@td-unit servis.ru

Веб-сайт: td-unit servis.ru

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2021 № 8 август

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

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

Издаётся с приложением
«Метрология»

УЧРЕДИТЕЛИ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

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

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

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

ФГУП «Всероссийский
научно-исследовательский
институт метрологической
службы»

ФГБУ «Российский институт
стандартизации»

МОО «Метрологическая академия»

СОДЕРЖАНИЕ

■ 30-ЛЕТИЕ КООМЕТ

- Д. Н. Зябликов, А. В. Иванов, А. В. Колдашов, С. Н. Марченко.** Государственный первичный эталон единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016 3
- В. Г. Кытин, М. Ю. Гавалян, А. А. Петухов, Б. Г. Потапов, Я. Е. Ражба, Э. Г. Асланян, А. Н. Щипунов.** Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина – в диапазоне от 0,3 до 273,16 К ГЭТ 35-2021: реализация нового определения единицы температуры 8
- А. Е. Исаев, Б. И. Хатамтаев.** Аналитическое представление комплексной частотной характеристики гидрофона 16
- А. Э. Асланян.** Региональные сличения национальных первичных эталонов твердости по шкалам Виккерса и Бринелля 21
- С. В. Медведевских, Е. П. Собина, О. Н. Кремлева, М. Ю. Медведевских, А. В. Собина, Н. С. Тараева.** Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 1. Международная практика по установлению прослеживаемости сертифицированных значений стандартных образцов 25
- С. В. Медведевских, Е. П. Собина, О. Н. Кремлева, М. Ю. Медведевских, А. В. Собина, Н. С. Тараева.** Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 2. Характеризация стандартных образцов 30
- О. В. Каминский, А. В. Клеопин, В. В. Макаров, Л. Н. Селин.** Национальные эталоны импульсного электрического напряжения Российской Федерации и Республики Беларусь: дополнительные сличения 38

■ ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

- Г. А. Нагиев, Н. А. Гулиева.** Косвенная оценка переменных состояния реакционно-регенерационных систем на основе компьютерной симуляции 41

■ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

- К. Г. Мишагин, С. Ю. Медведев.** Реализация метода оптимальной автоподстройки шкалы времени атомных часов 51
- Н. Н. Васильюк, А. П. Червонкин.** Релятивистская синхронизация часов навигационных космических аппаратов с использованием межспутниковых измерений 56

■ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- А. А. Затеев, Ю. М. Иванов, В. Г. Семенов.** Повышение точности измерений магнитного момента корабля в дальнем поле 67

Главный редактор
С. С. Голубев

Редакционная коллегия:

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

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

Сдано в набор: 23.07.2021.
Подписано в печать: 23.08.2021.
Формат 60х90 1/8. Бумага мелованная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11,3. Тир. 200 экз. Зак. 21-32и.
Свободная цена.

Отпечатано в ООО «Типография «Миттель Пресс»,
127254, Москва, ул. Руставели, 14, с. 6, оф. 7.

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

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

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

■ THE 30th ANNIVERSARY OF COOMET

<i>D. N. Zyablikov, A. V. Ivanov, A. V. Koldashov, S. N. Marchenko. State primary standard of optical density unit GET 206-2016</i>	<i>3</i>
<i>V. G. Kytin, M. Yu. Ghavalyan, A. A. Petukhov, B. G. Potapov, Ya. E. Razhba, E. G. Aslanyan, A. N. Schipunov. Realization of new definition of kelvin on National primary state standard of temperature in the temperature range from 0.3 K to 273.16 K GET 35-2021</i>	<i>8</i>
<i>A. E. Isaev, B. I. Khatamtaev. Analytical representation of hydrophone complex frequency response</i>	<i>16</i>
<i>A. E. Aslanyan. Regional comparisons of national primary standards machines on the Vickers and Brinell scales</i>	<i>21</i>
<i>S. V. Medvedevskikh, E. P. Sobina, O. N. Kremleva, M. Yu. Medvedevskikh, A. V. Sobina, N. S. Taraeva. The question of metrological traceability of COOMET reference materials. Pt. 1. International practice on traceability establishment of reference materials' certified values</i>	<i>25</i>
<i>S. V. Medvedevskikh, E. P. Sobina, O. N. Kremleva, M. Yu. Medvedevskikh, A. V. Sobina, N. S. Taraeva. The question of metrological traceability of COOMET reference materials. Pt. 2. Reference materials characterization</i>	<i>30</i>
<i>O. V. Kaminsky, A. V. Kleopin, V. V. Makarov, L. N. Selin. National standards of the impulse electrical voltage of Russian Federation and Republic of Belarus: additional comparisons</i>	<i>38</i>

■ GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

<i>H. A. Nagiyev, N. A. Guliyeva. Indirect estimation of state variables of industrial reaction-regeneration systems based on computer simulation</i>	<i>41</i>
---	-----------

■ TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

<i>K. G. Mishagin, S. Yu. Medvedev. Implementation of optimal automatic steering of atomic clock timescale</i>	<i>51</i>
<i>N. N. Vasilyuk, A. P. Chervonkin. Relativistic synchronization of onboard clocks of navigation space vehicles with the aid of intersatellite measurements</i>	<i>56</i>

■ ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

<i>A. A. Zateev, Yu. M. Ivanov, V. G. Semenov. Improving accuracy for measuring the ship's magnetic moment in the far field</i>	<i>67</i>
---	-----------

Журнал «Измерительная техника» продолжает публиковать статьи, подготовленные в рамках празднования 30-летия со дня образования организации Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений (KOOMET). Этому юбилейному событию полностью посвящён предыдущий тематический номер журнала («Измерительная техника» № 7, 2021 г.).

Актуальность представленных статей обусловлена тем, что в них отражены результаты и перспективы сотрудничества KOOMET в целом и деятельность национальных метрологических институтов стран-участниц KOOMET по основным тематическим областям, в первую очередь, в рамках направления «Эталоны физических величин».

Тематическая направленность статей этого номера посвящена вопросам совершенствования национальных эталонов единиц температуры и оптической плотности, исследованиям метрологических характеристик гидрофона, результатам сличений эталонов единиц твёрдости и импульсного электрического напряжения, а также вопросам метрологической прослеживаемости стандартных образцов KOOMET.

Данные статьи охватывают широкий спектр проводимых в странах-участницах KOOMET работ в области метрологии, результаты которых позволяют:

- обеспечивать потребности науки и промышленности в точных измерениях;
- декларировать и подтверждать измерительные и калибровочные возможности стран-участниц KOOMET в базе данных BIPM KCRB;
- совершенствовать эталонную базу и повышать уровень метрологического обеспечения в различных областях измерений в соответствии с постоянно растущими требованиями научно-технического прогресса к качеству измерений.

Обзорная статья

УДК 53.082.5

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-3-7>

Государственный первичный эталон единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016

Дмитрий Николаевич Зябликов¹, Александр Вячеславович Иванов², Артем Владимирович Колдашов³,
Сергей Николаевич Марченко⁴✉

^{1, 2, 3, 4} Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений, Москва, Россия

¹zyablikov@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4305-9654>

²ivanov@vniiofi.ru

³koldashov@vniiofi.ru

⁴marchenko@vniiofi.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2331-3267>

Аннотация. Описан Государственный первичный эталон единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016, принцип работы которого основан на фильтрации светового потока в проходящем и отражённом свете. Представлены состав и метрологические характеристики ГЭТ 206-2016. Приведены данные по исследованию геометрических и спектральных характеристик эталона. В настоящее время ГЭТ 206-2016 позволяет решать задачи метрологического обеспечения средств измерений оптической плотности в проходящем свете (радиографический неразрушающий контроль качества материалов в различных отраслях промышленности) и отражённом свете (полиграфия, приложения энергосберегающих и графических технологий).

Ключевые слова: оптическая плотность, диффузная оптическая плотность, метрологические характеристики, государственный первичный эталон, единица оптической плотности

Для цитирования: Зябликов Д. Н., Иванов А. В., Колдашов А. В., Марченко С. Н. Государственный первичный эталон единицы оптической плотности ГЭТ 206-2016 // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-3-7>

State primary standard of optical density unit GET 206-2016

Dmitriy N. Zyablikov¹, Aleksandr V. Ivanov², Artem V. Koldashov³, Sergey N. Marchenko⁴✉

^{1, 2, 3, 4} All-Russian Research Institute for Optical and Physical Measurements, Moscow, Russia

¹zyablikov@vniiofi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4305-9654>

²ivanov@vniiofi.ru

³koldashov@vniiofi.ru

⁴marchenko@vniiofi.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-2331-3267>

Abstract. The description of the State Primary Standard of optical density unit GET 206-2016 is given. The principle of operation of the standard, based on filtering the luminous flux of transmitted and reflected light, is described. The composition of the standard and its metrological characteristics are presented. Data on the study of the geometric and spectral characteristics of the standard are presented. Currently, GET 206-2016 allows solving the problems of metrological support of optical transmittance density measuring instruments (radiographic non-destructive quality control of materials in various industries) and optical reflection density measuring instruments (printing, applications of energy-saving and graphic technologies).

Keywords: optical density, diffuse optical density, the metrological characteristics, State primary reference standard, optical density

Введение. Методы оптической денситометрии, как в проходящем свете, так и в отражённом свете, находят широкое применение во многих сферах деятельности человека: в атомной энергетике, авиастроении, железнодорожном транспорте, металлургии, производстве газо- и нефтепроводов, биологии, медицине, полиграфии и др.

Несмотря на бурное развитие цифровых технологий использование рентгеновской плёнки остаётся актуальным в случаях, когда необходимо высокое разрешение и чёткое детализированное изображение больших размеров для контроля сложного оборудования, трубопроводов, выявления особо опасных дефектов, которые могут привести к необратимым последствиям. Радиографический неразрушающий контроль активно применяется при контроле качества материалов, выявлении дефектов в слитках, литых изделиях, сварных и паяных соединениях [1].

В настоящее время методы и аппаратные средства оптической денситометрии в отражённом свете находят широкое применение в области измерения оптической плотности в полиграфии, в приложениях графических технологий, оценке художественных графических материалов, произведений искусств, а также используются в солнечной энергетике и энергосберегающих технологиях для измерения оптической плотности в отражённом свете, коэффициентов диффузного отражения солнечных коллекторов, элементов фотовольтаики.

Анализ публикаций, посвящённых прецизионным измерениям диффузной оптической плотности, как в проходящем свете, так и в отражённом свете [2–8], показывает, что для измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете с высокой точностью в национальных метрологических институтах США, Германии, Китая используют эталонные денситометры, в которых применена однолучевая схема

с кремниевым фотодиодом в качестве фотоприёмника как наиболее приближённая к оптическим схемам, применяемым в практике измерения диффузной оптической плотности. Для измерения с высокой точностью диффузной оптической плотности в отражённом свете применяют оптическую схему, в которой реализуется геометрия кольцевого падающего потока излучения: освещение образца круговое, под углом 45° к нормали; апертурный угол освещающих пучков 5° ; измерение интенсивности отражённого излучения осуществляется в направлении нормали к поверхности образца, апертурный угол измеряемого пучка излучения 5° .

Цель работы – описание принципа действия, технических и метрологических характеристик ГЭТ 206-2016, предназначенного для воспроизведения, хранения и передачи вторичным эталонам единицы оптической плотности в проходящем и отражённом свете.

Принцип действия ГЭТ 206-2016. ГЭТ 206-2016 разработан с учётом геометрических и спектральных условий измерений диффузной оптической плотности в проходящем и отражённом свете. Эти условия установлены в международных стандартах ISO 5-2:2009 “Photography and graphic technology – Density measurements – Part 2: Geometric conditions for transmittance density” (ГОСТ Р ИСО 5-2:2019 «Технология фотографии и графики. Денситометрия. Часть 2. Геометрические условия для измерения оптической плотности по пропусканию»); ISO 5-3:2009 “Photography and graphic technology – Density measurements – Part 3: Spectral conditions” (ИСО 5-3:2009 «Фотография и полиграфические технологии. Денситометрия. Часть 3. Спектральные условия»); ISO 5-4:2009

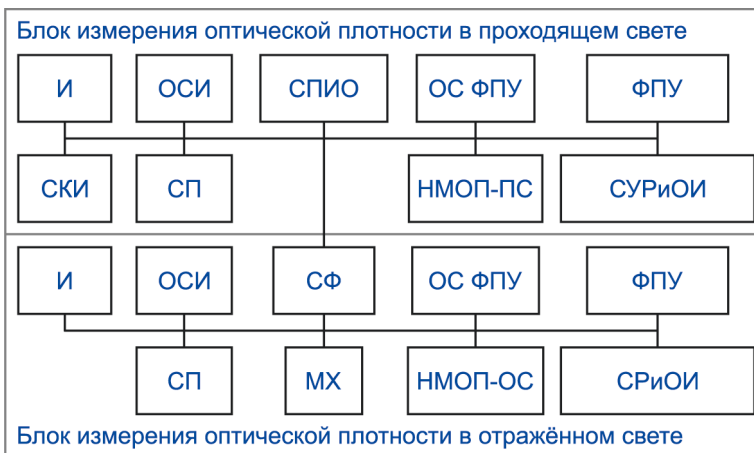


Рис. 1. Состав ГЭТ 206-2016:

И – излучатель; ОСИ – оптическая система излучателя; СПИО – система позиционирования измеряемого объекта; ОС ФПУ – оптическая система фотоприёмного устройства; ФПУ – фотоприёмное устройство; СКИ – система контроля излучателя; СП – система питания; СУРиОИ – система управления, регистрации и обработки информации; СРиОИ – система регистрации и обработки информации; СФ – спектрофотометр; МХ – монохроматор; НМОП-ПС, НМОП-ОС – набор мер оптической плотности соответственно в проходящем и отражённом свете

Fig. 1. The composition of GET 206-2016:

E – emitter; EOS – the emitter optical system; PSMO – positioning system of the measured object; PDOS – photodetector optical system; PD – photodetector; ECS – emitter control system; PS – power system; CSRIPI – control system, recording and processing information; SRPI – the system of registration and processing information; SP – spectrophotometer; MC – monochromator; SOTDM, SORDM – a set of optical transmittance and reflection density measures respectively

“Photography and graphic technology – Density measurements – Part 4: Geometric conditions for reflection density”.

ГЭТ 206-2016 состоит из двух эталонных комплексов измерения оптической плотности в проходящем и отражённом свете (рис. 1).

Оптическая схема эталонного комплекса измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете изображена на рис. 2. В схеме реализуется прямое измерение диффузной оптической плотности в проходящем свете на основе фильтрации светового потока. Поток излучения лампы 1 после прохождения оптической системы излучателя 2 и рассеивателя 3 падает на образец 4 (измеряемый объект – рентгеновскую плёнку или фотоплёнку). После измерительной диафрагмы 5 диаметром 3 мм, угловой апертурной диафрагмы 6 и оптической системы 7 поток излучения попадает на фотодиод, входящий в состав фотоприёмного устройства (ФПУ) 8, сигнал с которого регистрируется и обрабатывается на компьютере 9.

В оптической схеме ГЭТ 206-2016 реализована схема освещения образца: рассеиватель – образец – диафрагма. Результаты исследования геометрических параметров оптической схемы ГЭТ 206-2016 и геометрические условия, установленные в ISO 5-2:2009, приведены в табл. 1.

Спектральные характеристики светового потока, падающего на измеряемый объект – образец, и элементов, находящихся

Геометрические характеристики оптической схемы ГЭТ 206-2016

Характеристика	ГЭТ 206-2016	ISO 5-2:2009
Угол освещения для диффузного падающего потока, половина угла входной угловой апертуры, °	90	90
Контакт диафрагмы с образцом	Есть	Есть
Контакт рассеивателя с образцом	Есть	Есть
Отношение размера рассеивателя и апертуры образца	>>1	>>1

после измерительной диафрагмы, соответствуют спектральным условиям измерения диффузной плотности в проходящем свете, установленным в ISO 5-3:2009.

Оптическая схема эталонного комплекса измерения оптической плотности в отражённом свете изображена на рис. 3. Поток излучения от лампы 2 направляется кольцевым отражателем 1 и диафрагмой 4 на поверхность образца для измерения диффузной оптической плотности в отражённом свете 5. В оптической схеме реализуется геометрия кольцевого падающего потока излучения в форме кольцевого сходящегося конуса: освещение образца круговое, под углом 45° к нормали; апертурный угол освещающих пучков 5°. Отражённый в направлении нормали к поверхности образца поток излучения оптической системой ФПУ, содержащей призму 3, объектив оптической системы ФПУ 6, диафрагму 7, фильтр 8, оптический клин 9, направляется на фотодиод, входящий в состав ФПУ 10, сигнал с которого регистрируется и обрабатывается на компьютере 11.

В оптических схемах ГЭТ 206-2016 реализовано прямое измерение диффузной оптической плотности в проходящем и отражённом свете на основе фильтрации светового потока.

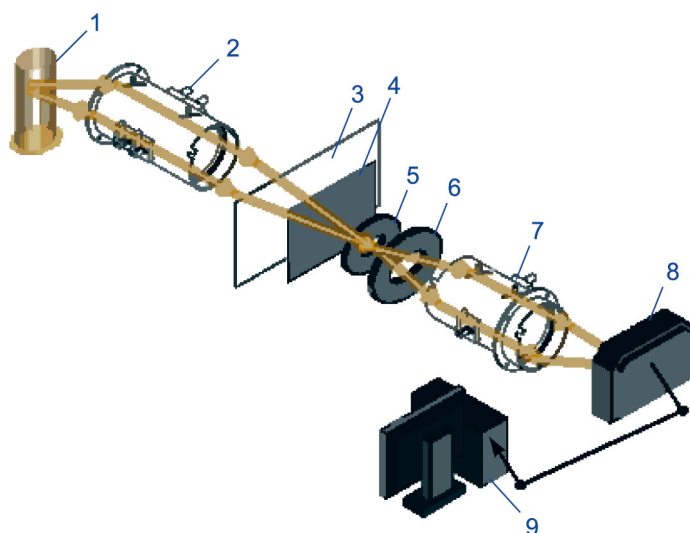


Рис. 2. Оптическая схема ГЭТ 206-2016 для измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете:
1 – лампа; 2, 7 – оптические системы излучателя и ФПУ соответственно; 3 – рассеиватель; 4 – образец; 5 – измерительная диафрагма; 6 – угловая апертурная диафрагма; 8 – ФПУ; 9 – компьютер

Fig. 2. The optical scheme of GET 206-2016 for measuring diffuse optical transmittance density:
1 – lamp; 2, 7 – optical systems of the emitter and the PD, respectively; 3 – diffuser; 4 – sample; 5 – measuring diaphragm; 6 – angular aperture diaphragm; 8 – PD; 9 – PC

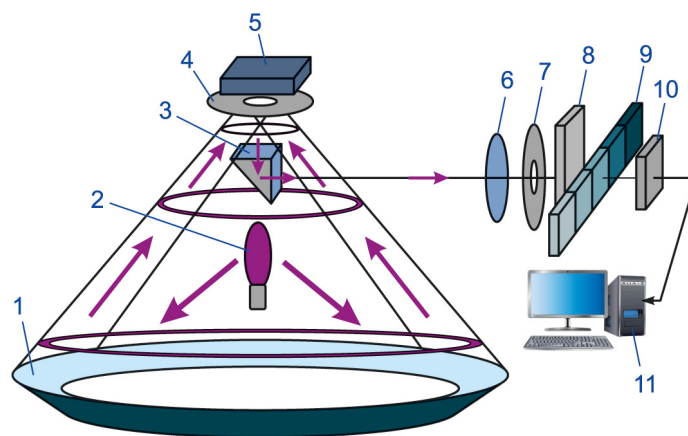


Рис. 3. Оптическая схема ГЭТ 206-2016 для измерения диффузной оптической плотности в отражённом свете:
1 – кольцевой отражатель; 2 – лампа; 3 – призма; 4 – диафрагма; 5 – образец для измерения диффузной оптической плотности в отражённом свете; 6 – объектив; 7 – диафрагма; 8 – фильтр ФПУ; 9 – оптический клин; 10 – ФПУ; 11 – компьютер

Fig. 3. The optical scheme of GET 206-2016 for measuring diffuse optical reflection density:
1 – ring reflector; 2 – lamp; 3 – prism; 4 – diaphragm; 5 – sample for the measurement of diffuse optical reflection density; 6 – lens; 7 – diaphragm; 8 – filter PD; 9 – optical wedge; 10 – PD; 11 – PC

В состав ГЭТ 206-2016 входят наборы мер диффузной оптической плотности в проходящем и отражённом свете. Наборы мер диффузной оптической плотности в проходящем свете выполнены на рентгеновской плёнке прямоугольной формы с переменнно меняющейся диффузной оптической плотностью в диапазоне 0,100–6,300 Б (20–23 поля). Наборы мер диффузной оптической плотности в отражённом свете содержат меры трёх конфигураций с переменнно меняющейся диффузной оптической плотностью в диапазоне 0,003–3,320 Б. Конфигурация 1 представляет собой плоскую меру диаметром 30 мм и/или 32 мм, диаметр корпуса 50 мм, диапазон диффузной оптической плотности 0,003–1,700 Б. Конфигурация 2 – мера с внутренней поверхностью в форме сферы, диаметр входного отверстия 15 мм, диаметр корпуса 60 мм, диапазон диффузной оптической плотности 1,200–2,900 Б. Конфигурация 3 – мера с внутренней поверхностью в форме конуса с диаметром входного отверстия 30 мм, диаметр корпуса 35 мм, диапазон диффузной оптической плотности 2,800–3,320 Б. Меры защищены от внешнего воздействия корпусом из дюралюминия. Общий вид наборов мер диффузной оптической плотности в отражённом свете представлен на рис. 4.

Уравнения измерений, описывающие процесс измерения диффузной оптической плотности в проходящем свете на

ГЭТ 206-2016, приведены в [5]. Для определения оптической плотности в отражённом свете как функции измеренных фото-сигналов ФПУ используем уравнение

$$D_p = \lg(S_{p \max}/S_p), \quad (1)$$

где D_p – оптическая плотность в отражённом свете; S_p , $S_{p \max}$ – измеренные в амперах сигналы для отражённого потока излучения от измеряемого образца и от меры, имеющей максимальное значение S_p .

Зависимость оптической плотности в отражённом свете от спектральных переменных выражается уравнением

$$D_p = \lg \left(\frac{\int L_j(\lambda) \rho_0(\lambda) \tau_f(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int L_j(\lambda) \rho(\lambda) \tau_f(\lambda) R(\lambda) d\lambda} \right), \quad (2)$$

где $L_j(\lambda)$ – энергетическая яркость падающего потока; $\rho(\lambda)$, $\rho_0(\lambda)$ – коэффициенты отражения излучения соответственно от измеряемого образца и максимально отражающего образца; $\tau_f(\lambda)$ – коэффициент пропускания фильтра ФПУ; $R(\lambda)$ – чувствительность ФПУ.

Уравнения (1), (2) являются уравнениями измерений оптической плотности в отражённом свете.

При измерении диффузной оптической плотности в отражённом свете существует несколько составляющих неопределённости, связанных с вычислением плотности в отражённом свете. Наиболее существенный вклад в суммарную стандартную неопределённость измерения оптической плотности вносят следующие составляющие: нелинейность ФПУ; шум фотосигнала; нестабильность излучения лампы; неопределённость, обусловленная неоднородностью оптической плотности в отражённом свете по апертуре образца; неопределённость установки нулевого значения оптической плотности.

Расширение функциональных возможностей ГЭТ 206-2016.

С целью обеспечения измерения оптической плотности по пропусканию в узкой полосе согласно ISO 5-3:2009 в 2020–2021 гг. модернизирована оптическая система ФПУ эталона. Усовершенствованная оптическая система ФПУ, содержащая узкополосные фильтры с номинальными значениями 405; 450; 480; 490; 600; 630 и 650 нм и полушириной не более 12 нм, позволяет измерять оптическую плотность по пропусканию в узкой полосе. В настоящее время проводится уточнение метрологических характеристик

ГЭТ 206-2016 при воспроизведении и передаче единицы оптической плотности по пропусканию в узкой полосе. Данный тип измерений особенно востребован при поверке, калибровке и испытании мер оптической плотности: КСП-01, КСП-02, КСП-03, НОСМОП 6-1, НОСМОП 6-2, НОСМОП-9, широко используемых в фотометрических анализаторах отечественного

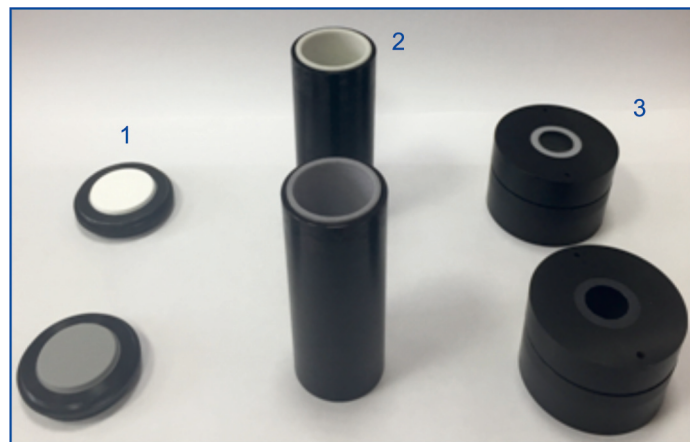


Рис. 4. Меры диффузной оптической плотности в отражённом свете: 1 – плоская мера диаметром 30–32 мм; 2, 3 – меры с внутренней поверхностью соответственно в форме конуса и сферы

Fig. 4. Measures of diffuse optical reflection density: 1 – a flat measure with a diameter of 30–32 mm; 2 – a measure with an inner surface in the shape of a cone; 3 – a measure with an inner surface in the shape of a sphere

Таблица 2

Основные метрологические и технические параметры ГЭТ 206-2016

Характеристика	В проходящем свете	В отражённом свете
Диапазон воспроизведения диффузной оптической плотности, Б	0,01–6,30	0,003–3,230
Диапазон длин волн, нм	340–770	340–770
Стандартная неопределённость, Б по типу А ($n=15$)	<0,002	0,0005
по типу В	<0,001	0,0026
Расширенная неопределённость ($P=0,99$, $k=3$), Б	<0,007	<0,008

Таблица 3

Диапазон измерения оптической плотности по пропусканию в узкой полосе и расширенная неопределённость

$\lambda_{\text{ном}}$, нм	D , Б	$U_{0,95}$, Б
405	0,113–5,790	0,189
450	0,120–5,846	0,104
480	0,105–5,752	0,028
490	0,102–5,837	0,045
600	0,100–6,043	0,012
630	0,113–5,869	0,008
650	0,110–5,724	0,007

и зарубежного производства, предназначенных для проведения анализа крови, сыворотки и других биожидкостей.

Результаты. В табл. 2 приведены основные метрологические и технические параметры ГЭТ 206-2016 (n – количество независимых измерений, P – уровень доверия, k – коэффициент охвата).

Диапазоны измерения оптической плотности D по пропусканию в узкой полосе и расширенная неопределённость $U_{0,95}$ ($P=0,95$, $k=2$) на длинах волн с номинальными значениями 405; 450; 480; 490; 600; 630 и 650 нм и полушириной не более 12 нм приведены в табл. 3.

В настоящее время с использованием ГЭТ 206-2016 ВНИИОФИ проводит пилотные сличения в рамках КООМЕТ 736/RU/17 «Диффузное поглощение образцов в проходящем свете» с участием национальных метрологических институтов семи стран (Армении, Беларуси, Китая, Молдовы, России, Узбекистана и Украины) и КООМЕТ 735/RU/17 «Диффузная оптическая плотность в отражённом свете» с участием национальных метрологических институтов трёх стран: Беларуси, Китая, России.

Заключение. ГЭТ 206-2016 обеспечивает воспроизведение и передачу единицы оптической плотности в проходящем и отражённом свете с помощью вторичных эталонов средствами измерений оптической плотности (наборам мер оптической плотности, денситометрам) с целью обеспечения единства измерений в стране.

Использование ГЭТ 206-2016 позволяет:

обеспечить метрологические условия для расширения диапазона измерения оптической плотности при радиографическом неразрушающем контроле до 6,3 Б, что будет способствовать выявлению особо опасных дефектов, которые недопустимы в деталях и оборудовании;

повысить уровень метрологического обеспечения в области измерений оптической плотности в отражённом свете в полиграфии, в приложениях энергосберегающих и графических технологий.

Расширение функциональных возможностей ГЭТ 206-2016 в области измерения оптической плотности по пропусканию в узкой полосе в диапазоне 405–650 нм позволит повысить уровень метрологического обеспечения в медицине и биологии при передаче единицы мер оптической плотности, широко используемым в фотометрических анализаторах, предназначенных для анализа крови, сыворотки и других биожидкостей.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования высокоточными измерительными технологиями в области фотоники (скр.vniiofi.ru), созданного на базе ФГУП «ВНИИОФИ» при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения соглашения № 05.595.21.0005 (уникальный идентификатор RFMEFI59519X0005).

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 1: Кн. 2. Ф. Р. Соснин. Радиационный контроль. М.: Машиностроение, 2006.

2. Early E. A., Cromer C. L., Xiong X. X., Dummer D. J., O'Brian T. R., Parr A., NIST reference densitometer for visual diffuse transmission density, *Journal of Imaging Science and Technology*, 1999, vol. 43, no. 4, pp. 388–397.

3. Buhr E., Hoeschen D., Bergmann D., The Measurement of Diffuse Optical Densities. Part II: The German Standard Reference Densitometers, *Journal of Imaging Science and Technology*, 1999, vol. 43, no. 4, pp. 382–387.

4. Rui C., Zai-qing L., Zi-long L., Yu W., Juan L., *Acta Metrologica Sinica*, 2011, vol. 32, no. 4, pp. 309–314.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2011.04.05>

5. Андреев В. И., Лясковский В. Л., Втулкин П. П., Марченко С. Н., Шатов А. В. Разработка Государственного первичного эталона единицы оптической плотности ГЭТ 206-2013 // Законодательная и прикладная метрология. 2014. № 6. С. 38–43.

6. Марков Б. Ф. *Ukrainian Metrological Journal*, 2014, no. 4, pp. 7–11.

7. Cooksey C., Nadal M., Allen D., Hauer K., Höpe A., *Applied Optics*, 2015, vol. 54, no. 13, pp. 4006–4015.
<https://doi.org/10.1364/AO.54.004006>

8. Chunnillal C., Deadman A., Crane L., Usadi E., *Metrologia*, 2003, vol. 40, no. 1, pp. S192–S195.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/344>

References

1. Non-destructive testing: Reference book: In 8 t., Ed. V. V. Klyuev, Vol. 1, Book 2, F. R. Sosnin, *Radiation control*, Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006.

2. Early E. A., Cromer C. L., Xiong X. X., Dummer D. J., O'Brian T. R., Parr A., NIST reference densitometer for visual diffuse transmission density, *Journal of Imaging Science and Technology*, 1999, vol. 43, no. 4, pp. 388–397.

3. Buhr E., Hoeschen D., Bergmann D., The Measurement of Diffuse Optical Densities. Part II: The German Standard Reference Densitometers, *Journal of Imaging Science and Technology*, 1999, vol. 43, no. 4, pp. 382–387.

4. Rui C., Zai-qing L., Zi-long L., Yu W., Juan L., *Acta Metrologica Sinica*, 2011, vol. 32, no. 4, pp. 309–314.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1158.2011.04.05>

5. Andreev V. I., Lyaskovskii V. L., Vtulkin P. P., Marchenko S. N., Shatov A. V., *Zakonodatelnaya i prikladnaya metrologiya*, 2014, no. 6, pp. 38–43. (In Russ.)

6. Markov B. F., *Ukrainian Metrological Journal*, 2014, no. 4, pp. 7–11. (In Russ.)

7. Cooksey C., Nadal M., Allen D., Hauer K., Höpe A., *Applied Optics*, 2015, vol. 54, no. 13, pp. 4006–4015.
<https://doi.org/10.1364/AO.54.004006>

8. Chunnillal C., Deadman A., Crane L., Usadi E., *Metrologia*, 2003, vol. 40, no. 1, pp. S192–S195.
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/1/344>

Статья поступила в редакцию 05.04.2021; принята к публикации 05.07.2021.

Научная статья

УДК 536.5.081:536.51

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-8-15>

Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина – в диапазоне от 0,3 до 273,16 К ГЭТ 35-2021: реализация нового определения единицы температуры

Владимир Геннадьевич Кытин¹✉, Мамикон Юрьевич Гавалян², Алексей Анатольевич Петухов³, Борис Геннадьевич Потапов⁴, Яков Евсеевич Ражба⁵, Эдуард Георгиевич Асланян⁶, Андрей Николаевич Щипунов⁷

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, ²ghavalyan@vniiftri.ru, ³petukhov@vniiftri.ru, ⁴potapov@vniiftri.ru, ⁵razhba@vniiftri.ru, ⁶aslanyan@vniiftri.ru, ⁷schipunov@vniiftri.ru

¹ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия, vkytin@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4049-823X>

Аннотация. Описан состав и метрологические характеристики Государственного первичного эталона единицы температуры – кельвина – в диапазоне от 0,3 до 273,16 К ГЭТ 35-2021. ГЭТ 35-2021 позволяет воспроизводить и передавать единицу температуры в соответствии с определением кельвина, принятым в 2018 г. на 26-й Генеральной конференции по мерам и весам. В состав ГЭТ 35-2021 введены разработанные в 2012–2019 гг. установки акустической газовой термометрии – первичные средства измерений температуры в диапазонах 79–273,16 К; 4,2–80 К; 268,16–273,16 К. Для повышения точности воспроизведения действующей температурной шкалы МТШ-90 усовершенствована аппаратура воспроизведения реперных точек шкалы. На основании проведённых исследований рассчитана неопределённость воспроизведения термодинамической температуры и температуры по шкале МТШ-90.

Ключевые слова: кельвин, термодинамическая температура, акустическая газовая термометрия, международная температурная шкала, тройная точка, платиновая термометрия

Для цитирования: Кытин В. Г., Гавалян М. Ю., Петухов А. А., Потапов Б. Г., Ражба Я. Е., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н. Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина – в диапазоне от 0,3 до 273,16 К ГЭТ 35-2021: реализация нового определения единицы температуры // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 8–15. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-8-15>

Realization of new definition of kelvin on National primary state standard of temperature in the temperature range from 0.3 K to 273.16 K GET 35-2021

Vladimir G. Kytin¹, Mamikon Yu. Ghavalyan², Aleksey A. Petukhov³, Boris G. Potapov⁴, Yakov E. Razhba⁵, Edward G. Aslanyan⁶, Andrey N. Schipunov⁷

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow region, Russia, ²ghavalyan@vniiftri.ru, ³petukhov@vniiftri.ru, ⁴potapov@vniiftri.ru, ⁵razhba@vniiftri.ru, ⁶aslanyan@vniiftri.ru, ⁷schipunov@vniiftri.ru

¹ M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, vkytin@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4049-823X>

Abstract. Description and metrological characteristics are presented of upgraded in 2021 equipment of National primary state standard of temperature on the temperature range from 0.3 K to 273.16 K GET 35-2021. GET 35-2021 allow to to the reproduce and disseminate the unit of temperature according to its definition accepted on 26th CGPM in 2018. Three installations of acoustic gas thermometry developed in 2012–2019 have been introduced in the National primary state standard covering ranges 79–273.16 K, 4.2–80 K, 268.16–273.16 K. The equipment for reproduction of fixed points of of International Temperature scale ITS-90 has been upgraded for uncertainty reduction. Uncertainty of reproduction of thermodynamic temperature and temperature according to ITS-90 have been calculated on the basis of investigations of upgraded equipment.

Keywords: kelvin, thermodynamic temperature, acoustic gas thermometry, international temperature scale, triple point, platinum thermometry

Введение. Единица измерения температуры – кельвин – входит в число основных единиц Международной системы единиц, поэтому её воспроизведение с наивысшей

точностью и передача образцовым и рабочим средствам измерений (СИ) является важной задачей, обеспечивающей единство измерений температуры. До 2019 г. кельвин

определяли через температуру тройной точки воды с описанным точным значением 273,16 К. Исследования ряда термометрических лабораторий показали, что применение для градуировки платиновых термометров сопротивления простых в реализации температур тройных точек чистых газов, заключённых в герметичные ампулы и отличающихся высокой воспроизводимостью (0,2 мК), позволяет повысить приблизительно в два раза точность температурной шкалы для значений более 24 К. Такие ампулы разработаны в некоторых лабораториях, в том числе и во ВНИИФТРИ.

Точные значения термодинамических температур, в том числе температур тройных точек газов, были получены с помощью первичного СИ температуры – газового термометра постоянного объёма в NPL (Великобритания), Kamerlingh Onnes Laboratory (Нидерланды), NMI (Австралия) и ВНИИФТРИ [1–4].

В диапазоне температур 0,65–13,81 К для воспроизведения температурной шкалы разработаны высокоточные (погрешность 0,3–0,5 мК) интерполяционные газовые термометры, конденсационные термометры и стабильные термометры сопротивления из сплава родия с железом [5].

Все эти достижения позволили принять в 1989 г. международную шкалу МТШ-90 (CCT Guidebooks: Guides to Thermometry 1. Guide to the Realization of the ITS-90: [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>), действующую по настоящее время.

Для температур от 0,0009 до 1 К в 2000 г. создана температурная шкала, основанная на кривой плавления гелия-3, и в 2000 г. рекомендована к применению Международным комитетом мер и весов под названием «предварительная низкотемпературная шкала ПНТШ-2000» (CCT Guidebooks: Guides to Thermometry 2. Guide to the Realization of the PLTS-2000: [Электрон. ресурс]. URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cc/cct/guides-to-thermometry>).

В последние годы достигнут значительный прогресс в повышении точности измерений термодинамической температуры первичными методами, основанными на законах термодинамики и статистической физики. В частности, разработан и создан сначала в NIST (США), а затем и в INRIM (Италия), LNE-CNAM (Франция) и в других странах первичный акустический газовый термометр [6–8]. В 2002–2017 гг. акустический газовый термометр использован для наиболее точного определения постоянной Больцмана [9–11]. Эти измерения, а также измерения методом диэлектрической газовой термометрии и шумовой термометрии подготовили переход к новому определению единицы температуры – кельвина.

Новое определение кельвина было принято на 26-й Генеральной конференции по мерам и весам (Resolutions of the 26th CGPM (2018), URL: <https://www.bipm.org/en/CGPM/db/26/>). Согласно новому определению, вступившему в силу в 2019 г., кельвин определяется через фиксированное значение постоянной Больцмана, равное $1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹.

В 2010 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина – в диапазоне от 0,3 до 273,16 К ГЭТ 35-2010 для воспроизведения единицы температуры по шкале МТШ-90 и ПНТШ-2000 в диапазоне 0,30–273,16 К. Основная часть ГЭТ 35-2010, предназначенная

для хранения и воспроизведения единицы температуры, – групповой эталон. Групповой эталон состоит из восьми высокостабильных эталонных термометров сопротивления (платиновых и родий-железных), размещённых в двух блоках сравнения и аттестованных по первичному (газовому, магнитному) термометру в шкале МТШ-90. В контрольную аппаратуру эталона также включены устройства для воспроизведения реперных точек: тройной точки воды; тройных точек аргона и ртути для длинностержневых платиновых термометров; запаянные ячейки тройных точек газов (водорода, неона, кислорода и аргона) вместе с адиабатическим криостатом для капсульных термометров сопротивления. Стабильность термометров в эталонных блоках сравнения контролировали по периодическим взаимным сличениям их показаний друг с другом и с реперными точками. Для воспроизведения шкалы ПНТШ-2000 в диапазоне температур 0,3–0,8 К в составе эталона используются два родий-железных термометра сопротивления ТСРЖН-М специальной конструкции. Теплообмен между чувствительным элементом и корпусом в данных термометрах осуществляется сверхтекучим гелием.

Опыт успешной эксплуатации эталона ГЭТ 35-2010 и его предшественника ГЭТ 35-91 в течение почти 20 лет подтвердил применимость концепции воспроизведения единицы температуры без использования газового термометра постоянного объёма как наиболее простой и экономичной. В то же время за счёт высокой долговременной стабильности используемых термометров сопротивления единица температуры воспроизводилась в течение по крайней мере 15 лет с неисключённой систематической погрешностью 0,5–1 мК, оцениваемой по взаимным сличениям эталонных термометров. Такой метод хранения и воспроизведения шкалы группой эталонных термометров сопротивления применялся на протяжении ряда лет и в других национальных метрологических институтах, например в NPL (Великобритания).

Согласно вступившему в силу в 2019 г. определению кельвина для воспроизведения единицы температуры необходимо использовать первичные методы, основанные на законах термодинамики и статистической физики. В настоящее время наиболее развитыми первичными методами являются акустическая и поляризационная газовые термометрии, шумовая термометрия.

Шкала МТШ-90 остаётся действующей, поэтому активно ведутся работы по уменьшению неопределённости её воспроизведения, а также измерению отклонения температуры по данной шкале от термодинамической температуры, измеряемой первичными методами [12, 13]. Подавляющее большинство применяемых на практике СИ температуры, например термометров сопротивления, калибруется по МТШ-90. Переход к воспроизведению единицы температуры в соответствии с новым определением кельвина должен происходить постепенно.

Таким образом, для реализации нового определения кельвина усовершенствован ГЭТ 35-2010 и утверждён Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина – в диапазоне от 0,3 до 273,16 К ГЭТ 35-2021. В процессе усовершенствования разработана и введена в состав эталона следующая аппаратура:

установки абсолютной и относительной акустической газовой термометрии для измерений термодинамической температуры в диапазоне температур 4,2–273,16 К;

усовершенствованная аппаратура для воспроизведения реперных точек шкалы МТШ-90, тройных точек неона, кислорода, аргона и ртути.

Цель настоящей статьи – представление принципа действия, конструкции и результатов метрологических исследований разработанной и введённой в состав эталона аппаратуры.

Установки акустической газовой термометрии для воспроизведения единицы температуры – кельвина – в соответствии с действующим определением. С целью введения в состав ГЭТ 35-2021 разработаны три установки акустической газовой термометрии: для абсолютного измерения термодинамической температуры в диапазоне 268,16–273,16 К; для измерения термодинамической температуры в диапазоне 79–273,16 К акустическим методом; для измерения термодинамической температуры в диапазоне 4,2–80 К акустическим методом.

Установка для абсолютного измерения термодинамической температуры в диапазоне 268,16–273,16 К. Данная установка реализует метод абсолютной акустической газовой термометрии в диапазоне 268,16–273,16 К, согласно которому температура определяется по формуле

$$T = \frac{C_V}{C_p} \frac{M}{R} c^2 \left\langle \frac{f_{a0(0,n)}^2}{\xi_{(0,n)}^2} \right\rangle \left\langle \frac{\xi_{TLM}^2}{f_{m0TLM}^2} \right\rangle, \quad (1)$$

где C_V , C_p – молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме и давлении соответственно; M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; c – скорость света в вакууме; ξ_{TLM} – число моды электромагнитного резонанса; (TLM : T – тип моды ТЕ или ТМ; L , M – натуральные числа, например, мода ТМ11); $\xi_{(0,n)}$ – число моды $(0, n)$ акустического резонанса; $f_{a0(0,n)}$ – частота акустического резонанса для моды $(0, n)$, соответствующая идеальному газу; f_{m0TLM} – частота электромагнитного резонанса для триплетных мод ($L=1$).

Частота f_{m0TLM} рассчитывается по формуле

$$f_{m0TLM} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (f_{mTLMi} + \delta f_{mTLMi})^2}, \quad (2)$$

где f_{mTLMi} , δf_{mTLMi} – частоты компонентов мод электромагнитного резонанса и поправки к ним.

Для определения входящей в выражение (1) частоты акустического резонанса $f_{a0(0,n)}$ измеряют частоты акустического резонанса при нескольких значениях давления гелия в резонаторе и одной и той же температуре. Полученные значения резонансных частот корректируют с помощью поправок, учитывающих теплообмен между газообразным гелием и стенками резонатора. Затем строят изотерму – зависимость квадрата частоты акустического резонанса от давления гелия в резонаторе. Значение $f_{a0(0,n)}^2$ определяется аппроксимацией изотермы, т. е. минимизацией выражения

$$\min \sum \left\{ \left[f_{a0(0,n)}(p_i) + \delta f_{a0(0,n)}(p_i) \right]^2 - a_{-1(0,n)} p_i^{-1} - f_{a0(0,n)}^2 - a_{1(0,n)} p_i \right\}^2,$$

где $a_{-1(0,n)}$, $a_{1(0,n)}$ – параметры аппроксимации изотермы.

Состав и принцип работы установки описаны в работе [14]. Центральной частью установки является термостат с размещённым внутри него устройством для реализации акустического резонанса. Данное устройство содержит квазисферический медный резонатор, размещённый внутри герметичной камеры, которая заполнена газообразным гелием и расположена внутри вакуумной камеры, откачанной до остаточного давления не более 0,01 Па. В состав установки также входит аппаратура для контроля и стабилизации температуры резонатора и давления газообразного гелия в резонаторе.

Исследования метрологических характеристик установки для абсолютного измерения термодинамической температуры в диапазоне 268,16–273,16 К проводили при температурах 268,16; 273,16 К: после выхода температуры на заданное значение (дрейф температуры не более 0,04 мК/мин) 10 раз измеряли комплексный коэффициент пропускания электромагнитного излучения резонатором для мод ТЕ11, ТЕ12, ТЕ13 ТМ12, ТМ13, затем резонатор заполняли газообразным гелием марки 7.0 до заданного давления. После повторного выхода температуры на заданное значение (дрейф температуры не более 0,04 мК/мин) однократно измеряли частотную зависимость акустического сигнала, десять раз измеряли акустический сигнал для фиксированной частоты и определяли его среднее квадратическое отклонение (СКО). Для заданного значения давления 10 раз измеряли температуру резонатора платиновыми термометрами сопротивления и определяли СКО температуры. Затем 10 раз измеряли давление газа и определяли его СКО. Частотную зависимость акустического сигнала измеряли для 11 различных значений давления гелия в резонаторе по 10 раз для каждого значения. Для каждого значения давления определяли резонансную частоту и полуширину линии акустического резонанса, а также вычисляли СКО частоты акустического резонанса для выбранных значений давления. На основании полученных СКО частоты акустического резонанса, температуры резонатора и давления рассчитывали СКО измеряемой температуры. Измерения частоты акустического резонанса повторяли через двое суток без смены газа в резонаторе. По изменению частоты акустического резонанса вычисляли неопределённость измерений по типу В, обусловленную изменением состава газа. Также рассчитывали неопределённость измерений по типу В, связанную с неопределённостью измерения давления. Неопределённость измерений по типу В радиуса резонатора находили из дисперсии квадрата отношения частоты электромагнитного резонанса к числам ξ_{TLM} мод электромагнитного резонанса, рассчитанного для разных мод.

Таблица 1

Бюджет неопределённости измерений термодинамической температуры при 268,16 и 273,16 К

Источник неопределённости	Тип	$u_c(T)$, мК, при T , К	
		268,16	273,16
Неопределённость измерения частоты акустического резонанса	A	0,19	0,20
Неопределённость измерения отклонения температуры резонатора от заданного значения	A	0,11	0,13
Неопределённость измерения давления гелия	A	0,12	0,12
	B	0,27	0,27
Неопределённость значения молярной массы гелия	B	0,14	0,15
Неопределённость определения среднего квадрата частоты электромагнитного резонанса	B	0,11	0,12
Неопределённость измерения термодинамической температуры при 10 независимых измерениях	A	0,25	0,27
Неопределённость измерения термодинамической температуры	B	0,32	0,33
Неисключённая систематическая погрешность	–	0,55	0,58
Суммарная стандартная неопределённость измерений	–	0,41	0,43

Суммарную стандартную неопределённость измерения термодинамической температуры вычисляли по формуле

$$u_c(T) = \sqrt{(u_A(T))^2 + (u_B(T))^2}, \quad (3)$$

где $u_A(T)$, $u_B(T)$ – стандартные неопределённости измерений по типам соответственно А (СКО) и В.

Неопределённости измерений рассчитывали по формуле измерений (1) для абсолютной акустической газовой термометрии. Результаты исследований метрологических характеристик установки для абсолютного измерения термодинамической температуры в диапазоне 268,16–273,16 К представлены в табл. 1.

Разработанная аппаратура абсолютной акустической газовой термометрии была использована для измерения в 2017 г. постоянной Больцмана [15].

Установка для измерения термодинамической температуры в диапазоне 79–273,16 К акустическим методом. В данной установке реализован метод относительной акустической газовой термометрии, в котором термодинамическая температура определяется по формуле

$$T = T_{TPW} \left\langle \frac{f_{a0(0,n)}^2(T)}{f_{a0(0,n)}^2(T_{TPW})} \right\rangle \left\langle \frac{f_{m0TLM}^2(T_{TPW})}{f_{m0TLM}^2(T)} \right\rangle, \quad (4)$$

где $T_{TPW} = 273,16$ К – температура тройной точки воды.

В соответствии с формулой (4) для определения термодинамической температуры требуются значения частот акустического и электромагнитного резонанса при фиксированных температуре и давлении газообразного гелия. Поэтому состав установки для измерения термодинамической температуры в диапазоне 79–273,16 К акустическим методом аналогичен составу установки для абсолютного измерения термодинамической температуры в диапазоне 268,16–273,16 К. Устройство для реализации акустического резонанса расположено внутри криостата, заполняемого

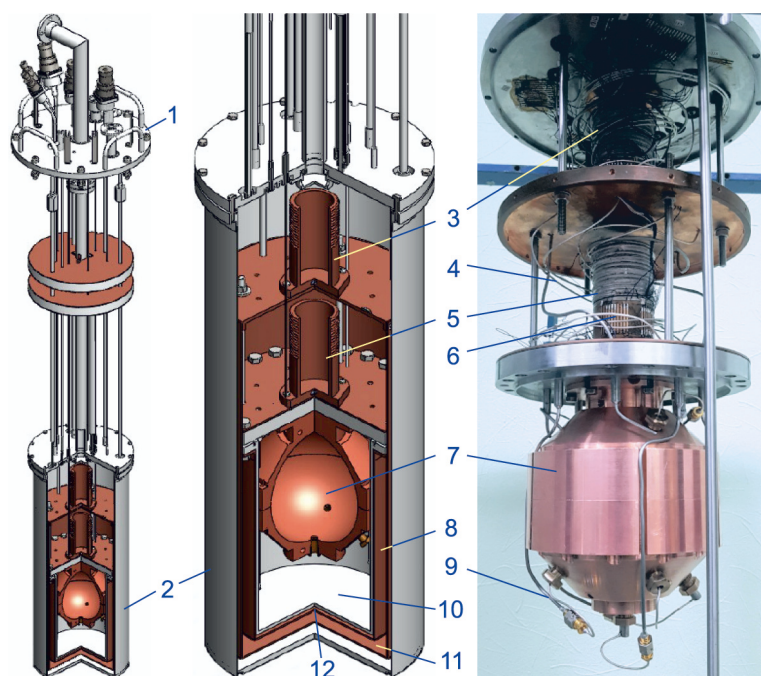


Рис. 1. Трёхмерная модель устройства для реализации акустического резонанса установки для измерения термодинамической температуры в диапазоне от 79 К до 273,16 К акустическим методом (слева) и вакуумная камера (справа):

1 – верхний фланец; 2 – вакуумная камера; 3, 5 – теплообменники теплового и медного экранов соответственно; 4 – коаксиальный кабель; 6 – теплообменная площадка для распайки проводов; 7 – резонатор; 8, 11 – медный и тепловой экраны соответственно; 9 – трубка для ввода коаксиального кабеля в камеру давления; 10 – камера давления; 12 – нагреватель

Fig. 1. 3D model of the inner part of cryostat of relative gas thermometry equipment in the temperature range from 79 K to 273.16 K acoustic method (left) and photograph of the inner part of vacuum chamber (right):

1 – top flange; 2 – vacuum chamber; 3, 5 – heat exchange tools of the heat and copper shield correspondingly; 4 – coaxial cable; 6 – heat conducting plate for wires; 7 – resonator; 8, 11 – cooper and heat shields correspondingly; 9 – tube with coaxial cable; 10 – pressure chamber; 12 – heater

жидким азотом, и имеет особенности, обусловленные работой в широком диапазоне температур. На рис. 1 показана трёхмерная модель устройства для реализации акустического резонанса. Устройство состоит из верхнего фланца 1 и вакуумной камеры 2, соединённых трубками для подачи и вывода газообразного гелия, а также ввода проводов и кабелей. Более подробно вакуумная камера устройства показана на рис. 1 справа.

Камера давления 10 с резонатором 7 окружена медным экраном 8, который имеет тепловой контакт с нагревателем на теплообменнике 5 и находится внутри теплового экрана 11. В верхней части теплового экрана на теплообменнике 3 также расположен нагреватель. Разность температур верхней и нижней частей теплового экрана измеряется дифференциальной термопарой. Для уменьшения данной разности температур в нижней части теплового экрана расположен третий нагреватель 12. Другая дифференциальная термопара измеряет разность температур описанных выше теплового и медного экранов. Внешние проводники коаксиальных кабелей для акустического и электромагнитного сигналов 4 припаяны к внутренней стороне крышки вакуумной камеры, а также к теплообменникам тепловых экранов для перехвата тепловых потоков от верхнего фланца и выравнивания температуры кабелей и экранов. С этой же целью провода для измерения сопротивления термометров, нагревателей и термопар припаяны к теплообменным площадкам 6, расположенным на внутренней стороне крышки вакуумной камеры и теплообменниках. Вне вакуумной камеры провода и кабели проходят внутри трубок 9, оканчивающихся герметичными вводами или разъёмами, т. е. в вакууме. Это исключает конденсацию влаги и электрические утечки, а также уменьшает десорбцию примесей из полимерной изоляции кабелей в камере давления.

Метрологические характеристики установки для измерения термодинамической температуры в диапазоне 79–273,16 К акустическим методом изучали по методике, аналогичной описанной выше методике исследований характеристик установки для абсолютного измерения термодинамической температуры в диапазоне 268,16–273,16 К.

Частоты акустического и электромагнитного резонанса измеряли при температурах 79 и 273,16 К. По изменению частоты акустического резонанса вычисляли неопределённость измерений по типу В, связанную с изменением состава газа. Также рассчитывали неопределённости измерений по типу В, обусловленные неопределённостями измерения давления и воспроизведения температуры тройной точки воды для резонатора. Неопределённость измерений по типу В изменения радиуса резонатора вычисляли из дисперсии квадрата отношения частоты электромагнитного резонанса при измеряемой температуре к частоте электромагнитного резонанса при температуре 273,16 К, рассчитанного для разных мод электромагнитного резонанса. Суммарную стандартную неопределённость измерения термодинамической температуры находили по формуле (3) с учётом формулы измерений (4) для относительной акустической газовой термометрии. Результаты метрологических исследований представлены в табл. 2.

Разработанный в 2016 г. прототип установки для измерения термодинамической температуры в диапазоне 79–273,16 К использовали для измерения отклонения температуры по шкале МТШ-90 от термодинамической температуры [13].

Установка для измерения термодинамической температуры в диапазоне 4,2–80 К акустическим методом.

В данной установке термодинамическая температура определялась методом относительной акустической газовой термометрии по формуле (4). Основное отличие данной установки от описанных выше установок – уменьшенный радиус внутренней полости резонатора: 30 мм вместо 50 мм. Такое уменьшение радиуса резонатора позволило более чем втрое уменьшить массу охлаждаемых частей устройства для реализации акустического резонанса и существенно сократить расход жидкого гелия при охлаждении и поддержании температуры резонатора. Кроме того, существенно уменьшилось время стабилизации температуры резонатора и, следовательно, полное время измерения температуры. Конструкция данной установки описана в работе [16].

Метрологические характеристики установки для измерения акустическим методом термодинамической температуры в диапазоне 4,2–80 К исследовали при температурах

Таблица 2

Бюджет неопределённости измерений термодинамической температуры акустическим методом при 79 и 273,16 К

Источник неопределённости	Тип	$u_c(T)$, мК, при T , К	
		79	273,16
Неопределённость измерения частоты акустического резонанса	A	0,410	0,14
Неопределённость измерения отклонения температуры резонатора от заданного значения	A	0,170	0,30
Неопределённость измерения давления гелия	A	0,150	0,12
	B	0,320	0,35
Неопределённость значения молярной массы гелия	B	0,091	0,29
Неопределённость переноса температуры тройной точки воды на резонатор	B	0,067	0,12
Неопределённость определения среднего отношения квадратов частот электромагнитного резонанса	B	0,210	0
Неопределённость измерения термодинамической температуры при 10 независимых измерениях	A	0,460	0,35
Неопределённость измерения термодинамической температуры	B	0,400	0,47
Неисключённая систематическая погрешность	–	0,700	0,81
Суммарная стандартная неопределённость измерений	–	0,610	0,58

Бюджет неопределённости измерений термодинамической температуры в диапазоне 4,2–80 К акустическим методом

Источник неопределённости	Тип	$u_c(T)$, мК, при T , К			
		4,2	5	8	80
Неопределённость измерения частоты акустического резонанса	A	0,1000	0,1500	0,1700	0,110
Неопределённость измерения отклонения температуры резонатора от заданного значения	A	0,0650	0,1100	0,1500	0,100
Неопределённость измерения давления гелия	A	0,0610	0,1000	0,1300	0,071
	B	3,6000	1,4000	0,5700	0,350
Неопределённость значения молярной массы гелия	B	0,0210	0,0310	0,0280	0,097
Неопределённость переноса температуры тройной точки воды на резонатор	B	0,0027	0,0033	0,0057	0,067
Неопределённость определения среднего отношения квадратов частот электромагнитного резонанса	B	0,0170	0,0210	0,0320	0,290
Неопределённость измерения термодинамической температуры при 10 независимых измерениях	A	0,1300	0,2100	0,2600	0,160
Неопределённость измерения термодинамической температуры	B	3,600	1,400	0,5700	0,470
Неисключённая систематическая погрешность	–	6,200	2,400	0,9800	0,810
Суммарная стандартная неопределённость измерений	–	3,800	1,400	0,6200	0,490

4,2; 5; 8; 80 К и температуре реперной точки 273,16 К по методике, аналогичной описанной выше для установки для измерения термодинамической температуры в диапазоне 79–273,16 К акустическим методом. Комплексный коэффициент пропускания электромагнитного излучения резонатором измеряли для мод TE₁₁, TE₁₂, TM₁₁, TM₁₂. Результаты метрологических исследований представлены в табл. 3.

Введение в состав эталона разработанных установок акустической газовой термометрии обеспечивает воспроизведение единицы температуры с неопределённостью не более 1,4 мК в диапазоне от 5 до 273,16 К в соответствии с действующим определением кельвина.

Усовершенствованная аппаратура для реализации реперных точек шкалы МТШ-90. Совершенствование аппаратуры для реализации реперных точек шкалы МТШ-90 проводилось с целью уменьшения неопределённости воспроизведения и передачи единицы температуры в соответствии с положением о шкале МТШ-90.

В 2017–2019 гг. во ВНИИФТРИ разработаны и изготовлены усовершенствованные ячейки тройных точек неона, кислорода и аргона для капсульных платиновых термометров сопротивления, а также криостат-вставка для работы данных ячеек. По сравнению с входившими в ГЭТ 35-2010 ячейками тройных точек газов усовершенствованные ячейки отличаются увеличенной массой газа и дополнительным тепловым экраном, снабжённым нагревателем и дифференциальной термопарой, что значительно уменьшило градиенты температуры внутри ячейки при реализации тройной точки. Схема и внешний вид ячейки тройной точки газов представлены в работе [17].

Также во ВНИИФТРИ разработаны и изготовлены усовершенствованные устройства для реализации тройных точек аргона и ртути для длиннострержневых платиновых термометров сопротивления. Схема и внешний вид устройства для реализации тройной точки аргона представлены на рис. 2. Устройство состоит из герметичной камеры 6, трубки 11 и вентиля 9 для откачки камеры,

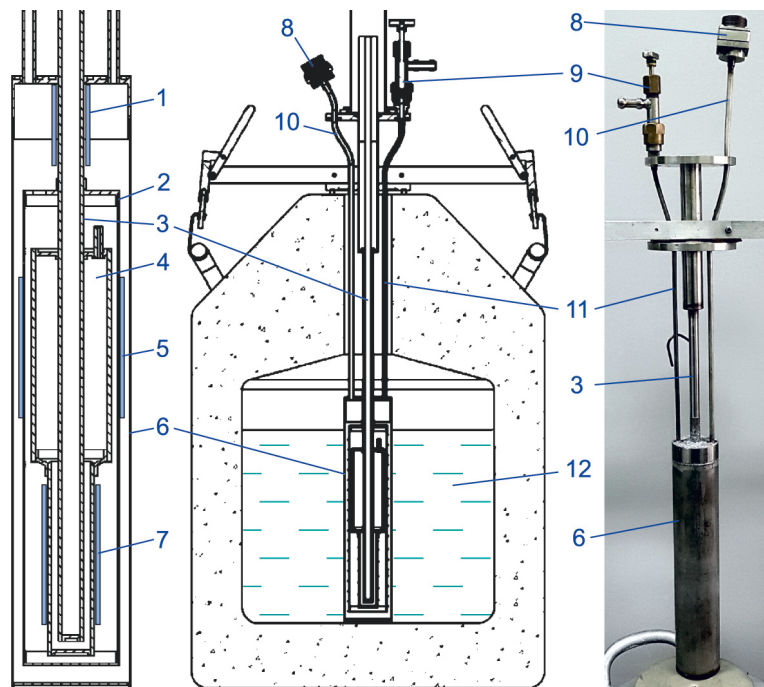


Рис. 2. Схема и внешний вид устройства для реализации тройной точки аргона для длиннострержневых платиновых термометров сопротивления: 1 – нагреватель трубки для размещения термометра; 2 – медный экран; 3 – трубка для термометра; 4 – ампула с аргоном; 5 – нагреватель медного экрана; 6 – герметичная камера; 7 – нагреватель ампулы; 8 – разъём; 9 – вентиль; 10 – трубка для ввода проводов; 11 – трубка откачки герметичной камеры; 12 – жидкий азот

Fig. 2. Scheme of the setup for realization of triple point of argon for long stem platinum resistance thermometers (left) and photograph of the setup (right): 1 – thermometer tube heater; 2 – copper shield; 3 – tube for thermometer; 4 – ampule with argon; 5 – copper shield heater; 6 – sealed chamber; 7 – ampule heater; 8 – connector; 9 – valve; 10 – tube for wires; 11 – tube for evacuation of sealed chamber; 12 – liquid nitrogen

трубки 10 и герметичного разъёма 8 для ввода проводов. В герметичной камере располагается медный экран 2, внутри которой находится ампула с аргоном 4. В ампулу введена

Таблица 4

Результаты метрологических исследований аппаратуры для воспроизведения шкалы МТШ-90

Тройная точка	$\Theta_{пр}$, мК	Θ_R , мК	Θ_M , мК	$\Theta_{г.п.}$, мК	$\Theta_{нст}$, мК	$\Theta_{ст}$, мК	Θ_9 , мК	НСП, мК	СКО, мК
Капсульные термометры									
Неон	35	5	20	32	32	156	72	200	110
Кислород	19	9	20	24	32	150	92	201	110
Аргон	22	17	20	20	32	147	96	201	100
Ртуть	27	44	42	15	32	162	45	203	180
Длинностержневые термометры									
Аргон	22	9	20	17	32	185	45	216	110
Ртуть	27	44	42	15	32	180	83	233	120

трубка для размещения длинностержневого термометра 3. На ампулу намотан резистивный нагреватель 7, а на медный экран – нагреватель 5. Разность температур между ампулой и экраном измеряется дифференциальной термопарой. При работе устройство помещается в сосуд с жидким азотом 12. При этом трубка с термометром проходит через жидкий азот, что обеспечивает перехват теплового потока из верхней части устройства, находящейся при комнатной температуре. Для компенсации холодоподвода от жидкого азота в верхней части герметичной камеры на трубку для размещения термометра намотан дополнительный нагреватель 1. Для перехвата теплового потока провода термопар и нагревателей распаяны на площадки, имеющие тепловой контакт с крышкой герметичной камеры, экраном и ампулой с аргонном. Аналогичная конструкция применена в устройстве для реализации тройной точки ртути для длинностержневых термометров.

Метрологические исследования ячеек реперных точек для капсульных термометров сопротивления проводили путём воспроизведения соответствующих реперных точек в криостате-вставке, а устройств для реализации реперных точек для длинностержневых термометров сопротивления – при воспроизведениях тройной точки аргона и тройной точки ртути в соответствующих устройствах. Неисключённую систематическую погрешность (НСП) в температурном эквиваленте вычисляли по формуле (в которой все составляющие погрешностей выражены в температурном эквиваленте):

$$\Theta = \pm k \sqrt{\Theta_{пр}^2 + \Theta_R^2 + \Theta_M^2 + \Theta_{г.п.}^2 + \Theta_{ст}^2 + \Theta_9^2},$$

где $k=1,1$ для доверительной вероятности $P=0,95$; $\Theta_{пр}$ – погрешность, вызванная влиянием примесей; Θ_R – погрешность меры электрического сопротивления; Θ_M – погрешность измерения сопротивления мостом; $\Theta_{г.п.}$ – погрешность, вызванная неопределённостью положения чувствительного элемента (неопределённость гидростатической поправки); $\Theta_{ст}$ – статическая погрешность измерения температуры; Θ_9 – погрешность экстраполяции к точке ликвидуса.

Для вычисления $\Theta_{пр}$ строят график $T(F^{-1})$, где F – процент содержания жидкой фазы, проводят линию тренда, экстраполируют её в точку 0 и вычисляют разность температур по линии тренда между точками 0 и 1. Погрешность $\Theta_{г.п.}$ находили с учётом

неопределённости положения чувствительного элемента термометра относительно поверхности раздела между газообразной и жидкой фазой термометрического вещества. Статическая погрешность измерения температуры $\Theta_{ст}$ обусловлена влиянием температуры экрана на показания термометра. Погрешность влияния экстраполяции к точке ликвидуса определяется неопределённостью линии тренда, проведённой через экспериментальные точки зависимости $T(F^{-1})$.

Результаты расчёта указанных выше составляющих погрешности, а также погрешности $\Theta_{нст}$, обусловленной кратковременной нестабильностью термометра, НСП и СКО приведены в табл. 4. СКО вычислялось по десяти независимым измерениям при трёх реализациях тройной точки и 50 % жидкой фазы вещества.

Совершенствование аппаратуры для воспроизведения реперных точек шкалы МТШ-90 значительно уменьшило неопределённость воспроизведения шкалы МТШ-90 в диапазоне 24,55–273,16 К. В настоящее время усовершенствованная аппаратура ГЭТ 35-2021 применяется в региональных ключевых сличениях длинностержневых платиновых термометров сопротивления в тройной точке ртути СООМЕТ.Т-К9.1. Участниками сличения являются национальные метрологические институты России (ВНИИФТРИ), Германии (ПТБ), Белоруссии (БелГИМ), Грузии (ГЕОСТМ), Казахстана (КазСтандарт) и Молдовы (НИСМ). Лаборатория-пилот – ВНИИФТРИ.

Заключение. В ГЭТ 35-2021 реализован первичный метод воспроизведения единицы температуры – акустическая газовая термометрия. Установки акустической газовой термометрии, введённые в состав эталона, воспроизводят единицу температуры в соответствии с её действующим определением в диапазоне температур 4,2–273,16 К с суммарной стандартной неопределённостью не более 1,4 мК в диапазоне температур 5–273,16 К и не более 3,8 мК в диапазоне 4,2–5 К. Кроме того, в состав эталона входит усовершенствованная аппаратура для воспроизведения реперных точек шкалы МТШ-90 с НСП менее 0,25 мК. Это позволяет воспроизводить и передавать единицу температуры в соответствии с действующим определением в широком диапазоне температур, а также воспроизводить с высокой точностью шкалу МТШ-90, что важно и для практических применений, и для прецизионных измерений отклонения температуры по шкале МТШ-90 от термодинамической температуры.

Список литературы

1. Steur P. P. M., Durieux M., *Metrologia*, 1986, vol. 23, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/23/1/002>
2. Schooley J. F., NBS/NIST Gas thermometry from 0 to 660 °C, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1990, vol. 95, pp. 255–290.
3. Preston-Thomas H., Kirby C. G. M., Gas thermometer determinations of the thermodynamic temperature scale in the range –183 °C to 100 °C, *Metrologia*, 1968, vol. 4, pp. 30–40.
4. Astrov D. N., Beliansky L. B., Dedikov Y. A., Polunin S. P., Zakharov A. A., *Metrologia*, 1989, vol. 26, pp. 151–166. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/26/3/001>

5. Rusby R., Head D., Meyer C., Tew W., Tamura O., Hill K. D., De Groot M., Storm A., Peruzzi A., Fellmuth B., Engert J., Astrov D., Dedikov Yu., Kytin G., *Metrologia*, 2006, vol. 43, 03002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/03002>
6. Benedetto G., Gavioso R. M., Spagnolo R., Marcarino P., Merlone A., *Metrologia*, 2004, vol. 41, pp. 74–98. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1/011>
7. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 142–162. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1/020>
8. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., De Podesta M., Zhang J. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, R1. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/1/R1>
9. Pitre L., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S263–S273. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/5/S263>
10. Gavioso R. M., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S274–S304. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/5/S274>
11. Podesta M., Underwood R., Sutton G., Morantz P., Harris P., Mark D. F., Stuart F. M., Vargha G., Machin G., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 354–376. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/4/354>
12. Gavioso R. M., Ripa D. M., Steur P. P. M., Dematteis R., Imbraguglio D., *Metrologia*, 2019, vol. 56, p. 045006. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab29a2>
13. Kytin V. G., Kytin G. A., Ghavalyan M. Yu., Potapov B. G., Aslanyan E. G., Schipunov A. N., *International Journal of Thermophysics*, 2020, vol. 41 (6), p. 88. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02663-2>
14. Осадчий С. М., Потапов Б. Г., Пилипенко К. Д. Акустический газовый термометр для реализации нового определения кельвина на основе фундаментальной физической константы Больцмана // Альманах современной метрологии. 2017. № 12 С. 15–39.
15. Осадчий С. М., Потапов Б. Г., Пилипенко К. Д., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н. Измерение постоянной Больцмана в квазисферическом акустическом резонаторе // Измерительная техника. 2017. № 7. С. 8–13. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-7-8-13>
16. Кытин В. Г., Гавалян М. Ю., Потапов Б. Г., Асланян Э. Г., Щипунов А. Н. Установка относительной акустической газовой термометрии в диапазоне низких температур от 4,2 до 80 К // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 45–52. <https://doi.org/10.32446/0369-1025it.2020-1-45-52>
17. Осадчий С. М., Потапов Б. Г., Петухов А. А., Пилипенко К. Д., Разба Я. Е. Реализация тройной точки кислорода для капсульных термометров // Альманах современной метрологии. 2020. № 1 (21). С. 136–147.
2. Schooley J. F., NBS/NIST Gas thermometry from 0 to 660 °C, *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, 1990, vol. 95, pp. 255–290.
3. Preston-Thomas H., Kirby C. G. M., Gas thermometer determinations of the thermodynamic temperature scale in the range –183 °C to 100 °C, *Metrologia*, 1968, vol. 4, pp. 30–40.
4. Astrov D. N., Beliansky L. B., Dedikov Y. A., Polunin S. P., Zakharov A. A., *Metrologia*, 1989, vol. 26, pp. 151–166. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/26/3/001>
5. Rusby R., Head D., Meyer C., Tew W., Tamura O., Hill K. D., De Groot M., Storm A., Peruzzi A., Fellmuth B., Engert J., Astrov D., Dedikov Yu., Kytin G., *Metrologia*, 2006, vol. 43, 03002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/03002>
6. Benedetto G., Gavioso R. M., Spagnolo R., Marcarino P., Merlone A., *Metrologia*, 2004, vol. 41, pp. 74–98. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1/011>
7. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L., *Metrologia*, 2006, vol. 43, pp. 142–162. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1/020>
8. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., De Podesta M., Zhang J. T., *Metrologia*, 2014, vol. 51, R1. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/1/R1>
9. Pitre L., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S263–S273. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/5/S263>
10. Gavioso R. M., *Metrologia*, 2015, vol. 52, pp. S274–S304. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/5/S274>
11. Podesta M., Underwood R., Sutton G., Morantz P., Harris P., Mark D. F., Stuart F. M., Vargha G., Machin G., *Metrologia*, 2013, vol. 50, pp. 354–376. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/4/354>
12. Gavioso R. M., Ripa D. M., Steur P. P. M., Dematteis R., Imbraguglio D., *Metrologia*, 2019, vol. 56, p. 045006. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab29a2>
13. Kytin V. G., Kytin G. A., Ghavalyan M. Yu., Potapov B. G., Aslanyan E. G., Schipunov A. N., *International Journal of Thermophysics*, 2020, vol. 41 (6), p. 88. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02663-2>
14. Osadchii S. M., Potapov B. G., Pilipenko K. D., Acoustic gas thermometer for realization of new definition of kelvin on the basis of fundamental physical Boltzmann constant, *Al'manac of Modern Metrology*, 2012, vol. 12, pp. 15–39. (In Russ.)
15. Osadchii S. M., Potapov B. G., Pilipenko K. D., Aslanyan E. G., Shchipunov A. N., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 7, pp. 656–665. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1251-y>
16. Kytin V. G., Gavalyan M. Yu., Potapov B. G., Aslanyan E. G., Shchipunov A. N., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 45–52. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01748-6>
17. Osadchii S. M., Potapov B. G., Petukhov A. A., Pilipenko K. D., Razhba Ya. E., Realization of the triple point of oxygen for capsule type thermometers, *Al'manac of Modern Metrology*, 2020, vol. 1 (21), pp. 136–147. (In Russ.)

References

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; принята к публикации 28.06.2021.

Научная статья

УДК 534.6.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-16-20>

Аналитическое представление комплексной частотной характеристики гидрофона

Александр Евгеньевич Исаев¹✉, Булат Ильгизович Хатамтаев²

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹isaev@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0718-5234>

²bulat_3004@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача аналитического представления экспериментальной комплексной частотной характеристики гидрофона на основе модели, состоящей из линии опережения и минимально-фазовой части. Модель учитывает резонансные свойства гидрофона и влияние дифракции звука на активном элементе. Предложены алгоритмы аппроксимации комплексной частотной характеристики дробно-рациональной функцией комплексной переменной по данным амплитудно-частотной и (или) фазочастотной характеристики гидрофона. Приведены примеры применения алгоритмов для обработки экспериментальных частотных характеристик измерительных гидрофонов. Полученные результаты позволят упростить калибровку и многократно сократить размерность калибровочных данных при сохранении точности, характерной для рабочих измерительных гидрофонов.

Ключевые слова: фазовая калибровка гидрофона, минимально-фазовая частотная характеристика, комплексная дробно-рациональная аппроксимация

Для цитирования: Исаев А. Е., Хатамтаев Б. И. Аналитическое представление комплексной частотной характеристики гидрофона // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 16–20. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-16-20>

Analytical representation of hydrophone complex frequency response

Alexander E. Isaev¹✉, Bulat I. Khatamtaev²

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI), Mendeleevo, Moscow Region, Russia

¹isaev@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-0718-5234>

²bulat_3004@mail.ru

Abstract. The problem of analytical representation of hydrophone complex frequency response based on a model consisting of an advance line and a minimum-phase part, which describing the effect of sound diffraction and resonance properties of an active element, is considered. Algorithms are proposed for approximating the hydrophone complex frequency response by a fractional-rational function of the complex variable according to the data of the hydrophone amplitude-frequency and/or phase-frequency responses. Examples of the application of these algorithms for processing experimental frequency characteristics of hydrophones are given.

Keywords: hydrophone phase calibration, minimum-phase frequency response, complex fractional-rational approximation

Введение. В гидроакустике наметился переход от измерений энергии звуковой волны к определению точной формы акустического сигнала. Этот переход обусловил создание эталонных установок, которые наряду с традиционно используемой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) позволяют определять фазочастотную характеристику (ФЧХ) гидрофона. Традиционная задача эталона в акустике – получение значения соответствующей физической величины для конкретной частоты, либо набора конкретных частот. Этого вполне достаточно для передачи единицы по ступеням поверочной схемы. Возможность определять

дискретные значения АЧХ и ФЧХ только на заданных частотах позволяет контролировать преобразователи, например, при их подборе для изготовления антенных решёток. Для решения задач, связанных с необходимостью восстанавливать форму акустического сигнала, требуются непрерывные АЧХ и ФЧХ. В таких случаях предпочтительно использовать аналитическое выражение комплексной чувствительности гидрофона, а не наборы данных АЧХ и ФЧХ.

Цель настоящей статьи – предложить приёмы, позволяющие представлять частотную характеристику чувствительности гидрофона аналитически в виде комплексной функции.

Аналитическое представление комплексной частотной характеристики чувствительности гидрофона. В [1] предложен способ построения модели гидрофона, состоящей из линии опережения и минимально-фазовой части, описывающей резонансные свойства гидрофона и влияние дифракции звука на активном элементе. При этом АЧХ гидрофона $M_r(f)$ не изменяется, а ФЧХ гидрофона $\varphi_r(f)$ имеет вид суммы двух составляющих:

$$\varphi_r(f) = \tilde{\varphi}_r(f) + \varphi_{л.о}(f),$$

где $\tilde{\varphi}_r(f)$ – минимально-фазовая частотная характеристика (МФЧХ) гидрофона; $\varphi_{л.о}(f)$ – фазовый набег на линии опережения.

Фазовый набег линии опережения аналитически представляет функция ka , где $k=2\pi f/c$ – волновое число; c – скорость звука; a – расстояние от поверхности активного элемента до опорной точки гидрофона [1]. Рассмотрим задачу аналитического представления частотной характеристики минимально-фазовой части модели гидрофона. В теории электрических цепей частотную характеристику минимально-фазовой системы принято описывать дробно-рациональной функцией комплексного переменного $p=jf$ [2]. Одно из преимуществ применения дробно-рациональной функции – физичность получаемого аналитического представления. Например, резонансы, найденные в результате решения дифференциального уравнения колебательного контура, являются полюсами, которые получены в результате факторизации дробно-рациональной функции.

Для аналитического представления используем идентификацию комплексной частотной характеристики чувствительности гидрофона в классе дробно-рациональных функций.

Дробно-рациональная аппроксимация по известным АЧХ и МФЧХ. Требуется представить комплексную частотную зависимость, заданную АЧХ гидрофона $M_r(f)$ и МФЧХ $\tilde{\varphi}_r(f) = \varphi_r(f) - \varphi_{л.о}(f)$ дробно-рациональной функцией

$$\frac{A(p) + a_0}{B(p) + 1} = \frac{\sum_{i=1}^M a_i p^i + a_0}{\sum_{i=1}^N b_i p^i + 1},$$

наилучшим (в смысле минимальной среднеквадратической погрешности) образом приближающей $M_r(f) \exp(j\tilde{\varphi}_r(f))$.

Без ущерба общности рассуждений в целях сокращения размерности задачи коэффициенты при нулевых степенях частоты в знаменателе и числителе дробно-рациональной функции будем считать известными. Примем эти коэффициенты равными соответственно единице и значению АЧХ, экстраполированной в сторону низких частот, на частоте нуль герц. При известных b_0, a_0 задача получения оценок $M+N$ коэффициентов $a_M, \dots, a_1; b_N, \dots, b_1$ по набору значений $M_r(f_k) \exp(j\tilde{\varphi}_r(f_k))$, $k=1, \dots, K$ ($K \geq M+N$), сводится к минимизации функционала невязки, нелинейного по искомым коэффициентам полинома знаменателя:

$$\sum_{k=1}^K \left[\frac{A(p_k) + a_0}{B(p_k) + 1} - M_r(f_k) \exp(j\tilde{\varphi}_r(f_k)) \right]^2. \quad (1)$$

В настоящее время используют различные подходы к решению задач подобного рода [3–10]. Один из таких подходов состоит в минимизации функционала методом последовательных приближений с использованием итерационной процедуры Санатанана-Кернера.

В предположении, что на итерации с номером $n-1$ получены приближенные оценки коэффициентов полинома знаменателя $b_{1n-1}, \dots, b_{Nn-1}$, из полученных коэффициентов образуют полином $B_{n-1}(p) = \sum_{i=1}^N b_{in-1} p^i + 1$. На шаге n итерационной процедуры вместо функционала невязки (1) минимизируют функционал

$$\sum_{k=1}^K \left(\frac{A(p_k) - (x_k + jy_k) B(p_k) - x_k + a_0 - jy_k}{B_{n-1}(p_k) + 1} \right)^2, \quad (2)$$

где $x_k = M_r(f_k) \cos(\tilde{\varphi}_r(f_k))$, $y_k = M_r(f_k) \sin(\tilde{\varphi}_r(f_k))$.

В выражение (2) искомые коэффициенты полиномов входят линейно, а множители $(B_{n-1}(p_k) + 1)^{-2}$ являются взвешивающими коэффициентами. Дифференцированием (2) по искомым коэффициентам получают систему нормальных уравнений, решение которой относительно оценок искомых коэффициентов $\Theta_n = (a_{1n}, \dots, a_{Mn}, b_{1n}, \dots, b_{Nn})^T$, получаемых на шаге с номером n итерационной процедуры, в матричной записи имеет вид

$$\Theta_n = [W^T S_n W]^{-1} W^T S_n H; \quad (3)$$

$$H = (x_1 - a_0, \dots, x_K - a_0, jy_1, \dots, jy_K)^T;$$

$$S_n = \text{diag} \{ (B_{n-1}(p_1) + 1)^{-2}, (B_{n-1}(p_2) + 1)^{-2}, \dots, \rightarrow \\ \rightarrow (B_{n-1}(p_K) + 1)^{-2} \};$$

$$W = \begin{pmatrix} 0 & p_1^2 & 0 & p_1^4 & 0 & \dots & -jy_1 p_1 & -x_1 p_1^2 & -jy_1 p_1^2 & -x_1 p_1^4 & -jy_1 p_1^5 & \dots \\ 0 & p_2^2 & 0 & p_2^4 & 0 & \dots & -jy_2 p_2 & -x_2 p_2^2 & -jy_2 p_2^2 & -x_2 p_2^4 & -jy_2 p_2^5 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & p_K^2 & 0 & p_K^4 & 0 & \dots & -jy_K p_K & -x_K p_K^2 & -jy_K p_K^2 & -x_K p_K^4 & -jy_K p_K^5 & \dots \\ p_1 & 0 & p_1^3 & 0 & p_1^5 & \dots & -x_1 p_1 & -jy_1 p_1^2 & -x_1 p_1^3 & -jy_1 p_1^4 & -x_1 p_1^5 & \dots \\ p_2 & 0 & p_2^3 & 0 & p_2^5 & \dots & -x_2 p_2 & -jy_2 p_2^2 & -x_2 p_2^3 & -jy_2 p_2^4 & -x_2 p_2^5 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_K & 0 & p_K^3 & 0 & p_K^5 & \dots & -x_K p_K & -jy_K p_K^2 & -x_K p_K^3 & -jy_K p_K^4 & -x_K p_K^5 & \dots \end{pmatrix}.$$

На первом шаге итерационной процедуры коэффициенты $b_{10}, \dots, b_{N0}$ принимают равными нулю.

Применение предложенной процедуры проиллюстрируем на примере гидрофона TC4033 (Teledyne RESON A/S, Дания). Частоту f задали в килогерцах. Данные МФЧХ получили вычитанием из экспериментальной ФЧХ фазового набег линии опережения. На рисунке представлены результаты минимизации функционала (1) при степенях полиномов числителя и знаменателя дробно-рациональной функции $M=2$ и $N=5$ соответственно. Нули и полюса дают более наглядное представление об аппроксимирующей дробно-рациональной функции в сравнении с коэффициентами полиномов. Получили решение: пара нулей $-49,88 \pm j90,93$; две пары полюсов

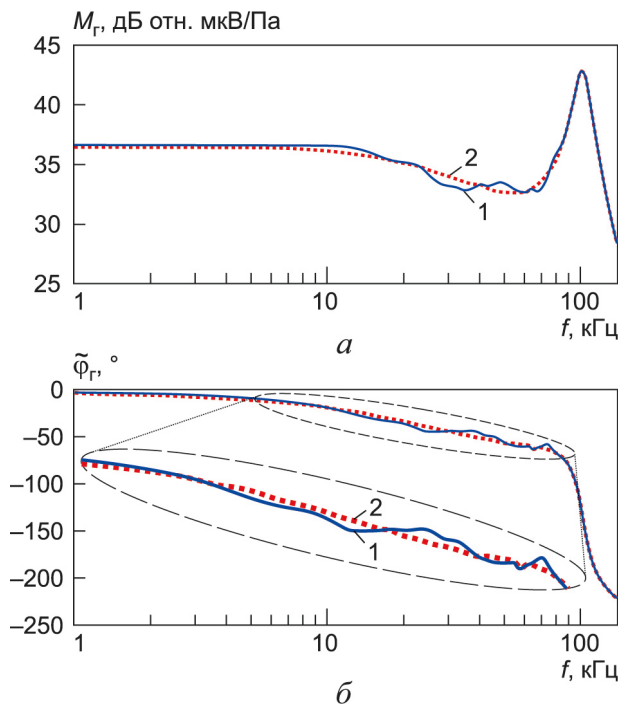
$-51,85 \pm j119,3$ и $-8,68 \pm j101,8$, расположенных симметрично относительно действительной оси комплексной плоскости; один отрицательный действительный полюс $-28,45$.

Согласно рисунку различие между экспериментальной АЧХ гидрофона 1 и её дробно-рациональной аппроксимацией 2 не превышает 0,7 дБ, что сопоставимо с погрешностями рутинных калибровок рабочих гидрофонов, а различие между МФЧХ гидрофона 1 и её дробно-рациональной аппроксимацией 2 не превышает 3° , что можно считать пренебрежимо малым.

Таким образом, комплексную частотную характеристику чувствительности гидрофона ТС4033 можно с достаточной точностью представить аналитически, используя фазовый набег на линии опережения ka и восемь параметров: константу $a_0 = M_r(0)$; два нуля (корни полинома числителя); пять полюсов (корни полинома знаменателя). Все нули и полюсы лежат в левой части комплексной плоскости – отличительное свойство минимально-фазовой системы.

Дробно-рациональная аппроксимация по известной АЧХ. Квадрат АЧХ гидрофона $M_r^2(f) = M_r(f)M_r^*(f)$ – действительная функция (* – символ комплексного сопряжения), которую можно представить отношением действительных полиномов чётных степеней переменной $p = jf$:

$$\frac{C(p) + c_0}{D(p) + 1} = \frac{\sum_{i=1}^M c_i(p)^{2i} + c_0}{\sum_{i=1}^N d_i(p)^{2i+1}}.$$



Экспериментальные (1) амплитудно-частотная (а) и минимально-фазовая частотная (б) характеристики гидрофона ТС4033 и их аппроксимации (2)

Frequency response of TC 4033 hydrophone (a), minimum-phase frequency response of TC 4033 hydrophone (b), experimental (1), approximation (2)

Без ущерба общности рассуждений, так же как и в рассмотренном выше случае обработки комплексных данных, в целях сокращения размерности задачи коэффициенты при нулевой степени частоты в знаменателе d_0 и числителе c_0 предположим известными, приняв их равными соответственно единице и квадрату АЧХ гидрофона на частоте нуль герц $M_r^2(0)$.

Оценки $M+N$ неизвестных коэффициентов $c_1, \dots, c_M, d_1, \dots, d_N$ получим минимизацией квадратичного функционала невязки:

$$\sum_{k=1}^K \left[\frac{C(p_k) + c_0}{D(p_k) + 1} - g_k \right]^2, \quad (4)$$

где $g_k = M_r^2(f_k)$, $k=1, \dots, K$ ($K \geq M+N$).

Аналогично ситуации с минимизацией функционала (1) минимум функционала (4) найдём методом последовательных приближений. На шаге с номером n итерационной процедуры вместо функционала невязки (4) будем минимизировать функционал

$$\sum_{k=1}^K \frac{1}{(D_{n-1}(p_k) + 1)^2} [C(p_k) - g_k D(p_k) - g_k + c_0]^2,$$

где $D_{n-1}(p)$ – полином с коэффициентами $d_{1,n-1}, \dots, d_{N,n-1}$, полученными на предыдущей итерации.

Выражение для оценок коэффициентов $\Theta_n = (c_{1,n}, \dots, c_{M,n}, d_{1,n}, \dots, d_{N,n})^T$ на шаге n итерационной процедуры в матричной записи имеет вид (3), где

$$H = (g_1 - c_0, g_2 - c_0, \dots, g_K - c_0)^T;$$

$$S_n = \text{diag} \{ (D_{n-1}(p_1) + 1)^{-2}, (D_{n-1}(p_2) + 1)^{-2}, \dots, \rightarrow$$

$$\rightarrow (D_{n-1}(p_K) + 1)^{-2} \};$$

$$W = \begin{pmatrix} p_1^2 & \dots & p_1^{2(M-1)} & p_1^{2M} & -g_1 p_1^2 & \dots & -g_1 p_1^{2(N-1)} & -g_1 p_1^{2N} \\ p_2^2 & \dots & p_2^{2(M-1)} & p_2^{2M} & -g_2 p_2^2 & \dots & -g_2 p_2^{2(N-1)} & -g_2 p_2^{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_K^2 & \dots & p_K^{2(M-1)} & p_K^{2M} & -g_K p_K^2 & \dots & -g_K p_K^{2(N-1)} & -g_K p_K^{2N} \end{pmatrix}.$$

На первом шаге процедуры коэффициенты $d_{1,0}, \dots, d_{N,0}$ принимают равными нулю.

Процедуру применили к АЧХ гидрофона ТС4033 при $M=2$ и $N=5$. Получили решение: четыре нуля и десять полюсов, расположенных симметрично относительно нуля комплексной плоскости. Для получения комплексной аппроксимации использовали действительный полюс $-28,45$, а также пары комплексных нулей $-45,32 \pm j121,2$ и полюсов $-28,88 \pm j133,1$; $-8,21 \pm j101,9$ в левой части комплексной плоскости.

Отличия полученной дробно-рациональной аппроксимации от экспериментальной АЧХ гидрофона не превысили 0,8 дБ. Для МФЧХ наибольшие отличия составили 12° и 15° вблизи частот 75 и 140 кГц соответственно, при этом для подавляющего большинства частот отличия не превысили 6° , что вполне приемлемо для выполнения операции

деконволюции. Наблюдаемое различие решений – расхождение значений нулей и полюсов и, соответственно, ухудшение качества аппроксимации является следствием использования данных только об АЧХ. К достоинствам алгоритма относится возможность представить комплексную частотную характеристику чувствительности гидрофона аналитически без учёта ФЧХ.

Дробно-рациональная аппроксимация по известной МФЧХ. Для минимально-фазовой части комплексной частотной характеристики чувствительности гидрофона $M_r(f_k)\exp(j\tilde{\varphi}_r(f_k))$, представленной дробно-рациональной функцией

$$\frac{A(p)}{B(p)} = \frac{a_0 + \sum_{i=1}^M a_i p^i}{1 + \sum_{i=1}^N b_i p^i},$$

запишем:

$$\frac{A(p)}{B(p)} = \frac{\operatorname{Re}[A(p)B^*(p)] + j\operatorname{Im}[A(p)B^*(p)]}{|B(p)|^2}.$$

Здесь действительная Re и мнимая Im части числителя являются, соответственно, чётной и нечётной функциями частоты:

$$\operatorname{Re}[A(p)B^*(p)] = S(f^2);$$

$$\operatorname{Im}[A(p)B^*(p)] = pT(f^2).$$

Минимально-фазовая частотная характеристика $\tilde{\varphi}_r(f)$ удовлетворяет соотношению $\operatorname{tg}(\tilde{\varphi}_r(f))/f = T(f^2)/S(f^2)$, которое представляет собой действительную дробно-рациональную функцию чётных степеней частоты.

Комплексная функция $Q(p) = [1 + j\operatorname{tg}(\tilde{\varphi}_r(f))]/[1 - j\operatorname{tg}(\tilde{\varphi}_r(f))]$ удовлетворяет соотношению

$$Q(p) = \frac{S(f^2) + pT(f^2)}{S(f^2) - pT(f^2)} = \frac{A(p)}{B(p)} \frac{B^*(p)}{A^*(p)}. \quad (5)$$

Из соотношения (5) следует, что $M_r(f_k)\exp(j\tilde{\varphi}_r(f_k))$ с точностью до действительного множителя определяется на основе выбора нулей и полюсов $Q(p)$, лежащих в левой части комплексной плоскости.

Возможны два сценария параметризации минимально-фазовой частотной характеристики в виде комплексной дробно рациональной функции.

Сценарий 1. По данным МФЧХ получают дробно-рациональную функцию $T(f^2)/S(f^2)$, из полиномов числителя и знаменателя которой строят вспомогательную функцию $Q(p)$. Для полученного выражения (5) проводят факторизацию полиномов числителя и знаменателя, отбирают нули и полюса в левой части комплексной плоскости. Таким образом, параметризацию $M_r(f_k)\exp(j\tilde{\varphi}_r(f_k))$ осуществляют путём дробно-рациональной аппроксимации данных о МФЧХ, конструирования функции $Q(p)$ и её факторизации.

Сценарий 2. По МФЧХ получают отсчёты действительной и мнимой частей функции $Q(p)$, выполняют дробно-рациональную

аппроксимацию полученного комплексного набора данных, проводят факторизацию полиномов числителя и знаменателя аппроксимирующей дробно-рациональной функции.

Заключение. Использование модели гидрофона, состоящей из линии опережения и минимально-фазовой части, описывающей влияние дифракции звука и резонансные свойства активного элемента, позволило применить методы дробно-рациональной аппроксимации для представления комплексной частотной характеристики чувствительности гидрофона аналитически по набору значений АЧХ и (или) ФЧХ. Применение предложенных приёмов представления частотной характеристики чувствительности гидрофона в виде комплексной функции позволяет многократно сократить размерность данных калибровки при сохранении точности, характерной для калибровки рабочих измерительных гидрофонов. Неоспоримое преимущество использования предложенного аналитического представления для решения задач восстановления формы акустического сигнала по принятому электрическому сигналу – возможность рассчитывать АЧХ и ФЧХ гидрофона с любым заранее заданным шагом по частоте, не прибегая к интерполяции.

Список литературы

1. Исеев А. Е., Хатамтаев Б. И. Определение фазочастотной характеристики гидрофона по его амплитудно-частотной характеристике чувствительности // Измерительная Техника. 2021. № 7. С. 48–53.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>
2. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров. Изд 12-е, испр. и доп. М.: Юрайт, 2014. 701 с.
3. Saptarshi Das, Indranil Pan, *Fractional order signal processing*, Springer, Berlin, 2011.
4. Duarte Valério, Manuel Duarte Ortigueira, José Sá da Costa, Identifying a transfer function from a frequency response, *Transactions of the ASME – Journal of Computational and Nonlinear dynamics*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 21–35.
5. Gustavsen B., Improving the pole relocating properties of vector fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21 (3), pp. 1587–1592.
6. Beattie C. A., Gugercin S., *Model reduction by rational interpolation*, In: Benner P., Cohen A., Ohlberger M., Willcox K. (eds.), *Model Reduction and Approximation: Theory and Algorithms*, SIAM, Philadelphia, 2017, 432 p.
7. Berljafa M., Güttel S., The RKFIT algorithm for nonlinear rational approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2017, vol. 39 (5), pp. 2049–2071.
8. Drmac Z., Gugercin S., Beattie C., Quadrature-based vector fitting for discretized H2 approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2015, vol. 37 (2), pp. A625–A652.
9. Drmac Z., Gugercin S., Beattie C., Vector fitting for matrix-valued rational approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2015, vol. 37 (5), pp. A2346–A2379.
10. Nakatsukasa Y., Trefethen L. N., An algorithm for real and complex rational minimax approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2020, vol. 42 (5), pp. A3157–A3179.

Reference

1. Isaev A. E., Khatamtaev B. I., *Izmeritel'naya tekhnika*, 2021, no. 7, pp. 48–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-48-53>
2. Bessonov L. A., *Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki. Ehlektricheskie tsepi: uchebnik dlya bakalavrov*, 12th ed., corrected and additional, Moscow, Yurite Publ., 2014, 701 p. (In Russ.)
3. Saptarshi Das, Indranil Pan, *Fractional order signal processing*, Springer, Berlin, 2011.
4. Duarte Valério, Manuel Duarte Ortigueira, José Sá da Costa, Identifying a transfer function from a frequency response, *Transactions of the ASME -Journal of Computational and Non-linear dynamics*, 2008, vol. 3, no. 2, pp. 21–35.
5. Gustavsen B., Improving the pole relocating properties of vector fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21 (3), pp. 1587–1592.
6. Beattie C. A., Gugercin S., *Model reduction by rational interpolation*, In: Benner P., Cohen A., Ohlberger M., Willcox K. (eds.), *Model Reduction and Approximation: Theory and Algorithms*, SIAM, Philadelphia, 2017, 432 p.
7. Berljafa M., Güttel S., The RKFIT algorithm for nonlinear rational approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2017, vol. 39 (5), pp. 2049–2071.
8. Drmac Z., Gugercin S., Beattie C., Quadrature-based vector fitting for discretized H2 approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2015, vol. 37 (2), pp. A625–A652.
9. Drmac Z., Gugercin S., Beattie C., Vector fitting for matrix-valued rational approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2015, vol. 37 (5), pp. A2346–A2379.
10. Nakatsukasa Y., Trefethen L. N., An algorithm for real and complex rational minimax approximation, *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2020, vol. 42 (5), pp. A3157–A3179.

Статья поступила в редакцию 17.03.2021; принята к публикации 01.06.2021.

Научная статья

УДК 620.178.152

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-21-24>

Региональные сличения национальных первичных эталонов твёрдости по шкалам Виккерса и Бринелля

Андрей Эдуардович Асланян

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия, andrey_aslanyan@vniiftri.ru

Аннотация. Определение и подтверждение калибровочных возможностей национальных метрологических институтов необходимы для верификации оценённых метрологических характеристик первичных эталонов. Сличения национальных первичных эталонов стимулируют глубокое и детальное изучение факторов, влияющих на неопределённость измерений. Внесение калибровочных возможностей метрологических институтов в базу данных Международного бюро мер и весов позволяет проводить калибровку средств измерений, признаваемую всем мировым сообществом. В статье приведены результаты сличений национальных первичных эталонов твёрдости по шкалам Виккерса и Бринелля метрологических институтов стран, входящих в Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений (КООМЕТ). Сличения проведены в рамках деятельности технического комитета по массе и связанным величинам ТК 1.6, шифр темы – 341/RU/05. Описана процедура региональных ключевых и дополнительных сличений национальных первичных эталонов твёрдости по шкалам Бринелля и Виккерса. По результатам сличений лабораториям, участвовавшим в сличениях, рекомендованы значения расширенных неопределённостей измерений, которые можно внести в базу данных Международного бюро мер и весов.

Ключевые слова: национальный первичный эталон, шкалы твёрдости Бринелля, шкалы твёрдости Виккерса, ключевые сличения, калибровочные и измерительные возможности

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

Regional comparisons of national primary standards machines on the Vickers and Brinell scales

Andrey E. Aslanyan

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia,
Andrey_aslanyan@vniiftri.ru

Abstract. The determination and confirmation of the calibration measurements capabilities of national metrological institutes is necessary for the verification of the estimated metrological characteristics of the primary standard machines of these institutes. The passage of national primary standards through the comparison procedure encourages a deep and detailed study of the factors that affect the uncertainty of measurements. Adding the calibration capabilities of metrological institutes to the database of the International Committee of Weights and Measures (hereinafter referred to as the CIPM) allows for calibration of measuring instruments, which is recognized by the entire world community. The article presents the results of comparisons of national primary hardness standards on the Vickers scale and on the Brinell scale between the metrological institutes of the countries that are members of the Organization of Euro-Asian Cooperation of state Metrological Institutions (COOMET). The comparisons were carried out within the framework of the technical committee on Mass and Related quantities TC 1.6, subject code – 341/RU/05. The article describes the procedure for conducting regional key and additional comparisons of national primary hardness standards on the Brinell and Vickers scales. Based on the results of the comparisons, recommendations are given to the laboratories that participated in the comparisons about the extended measurement uncertainties that they can enter into the database of the International Committee of Weights and Measures.

Keywords: national primary standard, Brinell hardness scales, Vickers hardness scales, key comparisons, calibration and measurement capabilities

Введение. В отраслях промышленности, таких как аэрокосмическая, машиностроение, судостроение, энергетика, металлургия, применяются механизмы, работающие в условиях огромных скоростей возрастания нагрузки в широком диапазоне температур под высоким давлением.

Следовательно, информация о механических свойствах материалов, используемых при производстве изделий в вышеперечисленных отраслях промышленности, имеет критическое значение. Для изучения механических свойств материалов используют методики испытаний материалов

Таблица 1

Результаты сличений национальных эталонов по шкалам Виккерса для уровней твёрдости HV 450 и HV 750

Шкалы	Параметр	ВНИИФТРИ	РТВ	КазИнМетр	БелГИМ	ННЦ ИМ
HV 450						
HV1	U	7,5	10,0	6,9	—	—
	H_{cp}	484,8	486,0	486,8	—	—
HV5	U	4,2	7,0	5,9	4,8	2,6
	H_{cp}	479,3	477,7	476,4	478,9	484,4
HV30	U	3,9	4,3	4,1	5,3	2,2
	H_{cp}	475,1	476,1	479,8	472,0	476,8
HV 750						
HV1	U	13,8	19,2	12,4	—	—
	H_{cp}	732,56	741,5	727,7	—	—
HV5	U	7,8	13,5	10,9	7,9	4,6
	H_{cp}	732,14	736,0	729,4	718,7	718,68
HV30	U	7,2	8,0	7,7	8,1	4,0
	H_{cp}	720,5	728,0	732,9	717,1	728

Таблица 2

Степени эквивалентности и их неопределённости по отношению к результатам ключевых сличений по линии МБМВ для уровней твёрдости HV 450 и HV 750

Шкалы	Параметр	ВНИИФТРИ	КазИнМетр	БелГИМ	ННЦ ИМ
HV 450					
HV1	U_d	7,4	7,3	—	—
	d	2,2	4,2	—	—
HV30	U_d	5,0	5,0	5,2	4,8
	d	—3,6	1,0	—6,9	—1,9
HV 750					
HV1	U_d	17,5	17,7	—	—
	d	—4,5	—9,4	—	—
HV30	U_d	11,3	11,3	11,4	11,0
	d	—0,5	11,9	—3,9	7,0

на растяжение и сжатие. Однако данные методики требуют большого ресурса, их сложно реализовать на практике, а для некоторых образцов невозможно. Для устранения указанных недостатков в промышленности широкое распространение получили методы измерения твёрдости. Согласно РМГ 29-2013 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения» твёрдость является порядковой величиной, зависящей от методов воспроизведения. Порядковые величины [1–3] могут входить только в эмпирические соотношения и не имеют ни единиц измерения, ни размерностей величин. Согласно общемировой практике средства измерений твёрдости прослеживаются к национальным первичным эталонам [4].

Достоверным способом оценки расширенной неопределённости измерений национального первичного эталона считаются ключевые или дополнительные международные сличения. Для сличений по теме 341/RU/05 выбраны национальные первичные эталоны, реализующие методы Виккерса и Бринелля. Данные методы измерений твёрдости являются широко распространёнными в промышленности большинства стран мира.

Тема 341/RU/05 включала в себя ключевые региональные сличения национальных первичных эталонов по шкалам твёрдости Виккерса и Бринелля. Пилот сличений – Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Так как ВНИИФТРИ участвовал в ключевых международных сличениях по шкалам твёрдости Виккерса и Бринелля по линии Международного бюро мер и весов (МБМВ), то в ходе региональных сличений остальные участники могли оценить степени эквивалентности своих первичных эталонов. Ключевые сличения по шкалам Бринелля по линии МБМВ переквалифицированы в пилотные в связи с тем, что протокол сличений не охватил все влияющие на измерения факторы [5, 6]. По этой причине ключевые сличения КООМЕТ по шкалам Бринелля были переквалифицированы в дополнительные.

В ключевых региональных сличениях национальных эталонов твёрдости по шкалам Виккерса принимали участие национальные метрологические институты: ВНИИФТРИ (Россия), Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ) (Беларусь), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Германия), Национальный научный центр «Институт метрологии» (ННЦ ИМ) (Украина), Казахский институт стандартизации и метрологии (КазИнМетр) (Казахстан). В дополнительных региональных сличениях национальных эталонов по шкалам твёрдости Бринелля принимали участие только ВНИИФТРИ, БелГИМ, ННЦ ИМ, КазИнМетр.

Цель сличений – определить калибровочные возможности национальных эталонов твёрдости по шкалам Виккерса и Бринелля стран, участвующих в этих мероприятиях.

Цель работы – описать способы оценки расширенных неопределённостей измерений национальных первичных эталонов твёрдости по шкалам Виккерса и Бринелля в рамках сотрудничества ведущих метрологических институтов стран, входящих в КООМЕТ.

Процедура сличений. Сличения состояли в воспроизведении чисел твёрдости Виккерса и Бринелля на национальных эталонах твёрдости. Числа твёрдости передавали от национальных эталонов рабочим эталонам в виде эталонных мер твёрдости. Первые измерения проводили в институте-пилоте сличений, затем меры твёрдости передавали другим участникам для измерений.

На мерах твёрдости были выделены поля, предназначенные для однократного измерения твёрдости одним участником сличений. Каждому институту предназначалось пять полей для измерений по одной шкале твёрдости. После выполнения измерений последними участниками меры твёрдости были возвращены в институт-пилот и проведены повторные измерения, чтобы убедиться в отсутствии дрейфа твёрдости меры.

Критерием стабильности значений мер твёрдости было условие

$$|\Delta_{2-1}|/U < 1, \quad (1)$$

где Δ_{2-1} – изменение твёрдости мер, определённое пилотом сличений; U – расширенная неопределённость измерений национального эталона института-пилота сличений.

Если отношение изменения твёрдости меры за время сличений к расширенной неопределённости измерений национального первичного эталона меньше единицы (см. (1)), то значения мер твёрдости считаются стабильными и изменение твёрдости во времени не влияет на результаты сличений. Если выражение (1) больше единицы, то необходимо учитывать изменение твёрдости меры во времени.

Каждый институт оценивал расширенную неопределённость измерений твёрдости по шкалам Виккерса и Бринелля на национальных эталонах [7, 8].

Сличения проводили по шкалам Виккерса HV1, HV5, HV30 для уровней твёрдости 450; 750, а также по шкалам Бринелля HBW 10/1000/10, HBW 10/3000/10, HBW 5/250/10, HBW 5/750/10 для уровней твёрдости 100; 200; 400.

По результатам измерений твёрдости по шкалам Виккерса определяли степени эквивалентности участников сличений по отношению к результатам ключевых международных сличений национальных первичных эталонов по шкалам Виккерса по линии МБМВ [9]. Степени эквивалентности определяли по формуле

$$d_i = H_i + \Delta - H_{ref}, \quad (2)$$

где d_i – степень эквивалентности i -го метрологического института; H_i – результаты измерений твёрдости в ключевых региональных сличениях; Δ – аддитивная поправка, определяется как разность значений, полученных связующим институтом в ключевых сличениях МБМВ и региональных сличениях; H_{ref} – опорное значение ключевых сличений МБМВ.

Критерием корреляции оценённых неопределённостей измерений твёрдости по шкалам Виккерса в национальных метрологических институтах с результатами ключевых сличений по линии МБМВ служило выражение

$$|d_i| < 2U_{d_i}, \quad (3)$$

где U_{d_i} – неопределённость степени эквивалентности.

Если степень эквивалентности меньше удвоенной неопределённости измерений степени эквивалентности, то оценки расширенных неопределённостей измерений национальных эталонов твёрдости стран-участниц региональных сличений согласуются с результатами международных ключевых сличений и могут считаться калибровочными возможностями метрологических институтов.

Для дополнительных региональных сличений национальных эталонов по шкалам Бринелля предусмотрена процедура оценки расширенных неопределённостей измерений [10] для создания записей о калибровочных возможностях институтов-участников сличений в информационной базе МБМВ.

Таблица 3

Результаты сличений национальных эталонов по шкалам Бринелля для уровней твёрдости HBW 100, HBW 200, HBW 400

Шкалы	Параметр	Опорное значение	ВНИИФТРИ	КазИнМетр	БелГИМ	ННЦ ИМ
HBW 100						
HBW 5/250/15	U H_{cp}	0,4 98,6	0,7 98,5	0,5 98,7	– –	1,5 98,6
HBW 10/1000/15	U H_{cp}	0,3 100,0	0,7 100,1	0,5 100,1	0,7 99,4	0,7 100,5
HBW 200						
HBW 5/750/15	U H_{cp}	1,0 219,6	1,6 220,7	1,5 218,6	– –	3,2 219,5
HBW 10/3000/15	U H_{cp}	0,6 218,4	1,6 217,8	0,7 218	1,9 219,2	1,6 220,2
HBW 400						
HBW 5/750/15	U H_{cp}	1,5 423,0	2,8 422,0	2,4 423,9	– –	2,7 422,9
HBW 10/3000/15	U H_{cp}	1,2 428,3	3,1 426,8	1,7 428,2	3,5 426,3	2,5 430,5

Таблица 4

Оценка минимальной расширенной неопределённости измерений твёрдости по шкалам Бринелля для СМС-строк

Шкалы	Параметр	Опорное значение	ВНИИФТРИ	КазИнМетр	БелГИМ	ННЦ ИМ
HBW 100						
HBW 5/250/15	U_{CMC} χ^2 χ^{2n-1} En	98,6	0,7 0,22 5,99 0,22	0,5 0,22 5,99 0,23	– – – –	0,7 0,22 5,99 0,02
HBW 10/1000/15	U_{CMC} χ^2 χ^{2n-1} En	100,0	0,7 5,16 7,81 0,1	0,5 5,16 7,81 0,16	0,7 5,16 7,81 1,02	0,7 5,16 7,81 0,74
HBW 200						
HBW 5/750/15	U_{CMC} χ^2 χ^{2n-1} En	219,6	1,6 3,67 5,99 0,92	1,5 3,67 5,99 0,9	– – – –	1,6 3,67 5,99 0,02
HBW 10/3000/15	U_{CMC} χ^2 χ^{2n-1} En	218,4	1,6 7,62 7,81 0,37	0,7 7,62 7,81 0,88	1,9 7,62 7,81 0,46	1,9 7,62 7,81 1,23
HBW 400						
HBW 5/750/15	U_{CMC} χ^2 χ^{2n-1} En	423,0	2,8 1,08 5,99 0,44	2,4 1,12 5,99 0,47	– – – –	2,7 1,12 5,99 0,06
HBW 10/3000/15	U_{CMC} χ^2 χ^{2n-1} En	428,3	3,1 5,35 7,81 0,52	1,7 5,35 7,81 0,08	3,5 5,35 7,81 0,61	2,5 5,35 7,81 1,005

Результаты сличений. Средние значения твёрдости H_{cp} и расширенные неопределённости измерений U по шкалам Виккерса, полученные метрологическими институтами, представлены в табл. 1.

Степени эквивалентности и их неопределённости приведены в табл. 2, откуда следует, что критерий (3) выполняется и информация о калибровочных возможностях метрологических институтов по шкалам Виккерса может быть внесена в базу данных МБМВ.

Результаты дополнительных региональных сличений национальных эталонов по шкалам Бринелля представлены в табл. 3.

В табл. 4 рассчитаны минимальные расширенные неопределённости $U_{\text{СМС}}$ измерений для внесения в качестве калибровочных и измерительных возможностей (calibration and measurement capabilities – СМС) в базу данных МБМВ на основании критериев корреляции χ , χ^{2n-1} , En , рассчитанных в соответствии с [10]. Результаты измерений для каждого национального метрологического института считаются согласованными, если для этого института выполняется условие $\chi < \chi^{2n-1}$.

Заключение. Полученные участниками сличений результаты согласуются между собой. На основании сделанных измерений и оценок расширенных неопределённостей измерений БелГИМ опубликовал измерительные возможности в базе данных МБМВ. Национальные метрологические институты Казахстана и Украины в базе данных МБМВ опубликовали измерительные возможности по шкалам Виккерса, калибровочные возможности этих институтов по шкалам Бринелля находятся в стадии публикации. ВНИИФТРИ также подтвердил калибровочные возможности по шкалам Бринелля и Виккерса.

Список литературы

1. Дойников А. С. Современное состояние понятийно-терминологической системы метрологии // Альманах современной метрологии. 2016. № 3 (8). С. 9–25.
2. Асланян Э. Г. Метрологическое обеспечение измерений твёрдости // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 45–50.
3. Дойников А. С. Лекции по метрологии. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. 292 с.
4. Germak A., Herrmann K., Low S., *Metrologia*, 2010, vol. 47, no. 2, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S07>
5. Germak A., Origlia C., Analysis and estimation of possible large systematic error in Brinell hardness measurements, *Proceedings of Hardmeko 2007*, Tsukuba, Japan, 19–21 November 2007, pp. 76–80.
6. Hattori K., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1065, no. 6, 062013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/6/062013>

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

8. Aslanyan E., Menelao F., Herrmann K., Aslanyan A., Pivovarov V., Galat E., Dovzhenko Y., Zhamanbalin M., *Metrologia*, 2013, vol. 50, no. 1A, 07015. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/1A/07015>

9. Herrmann K., *Metrologia*, 2006, vol. 43, no. 1A, 07010. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/07010>

10. Рекомендация КООМЕТ. Руководство по оцениванию данных дополнительных сличений КООМЕТ. COOMET R/GM/19:2016. URL: http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2016/5/2LWQGO.pdf (дата обращения: 10.06.2021).

References

1. Doynikov A. S., Current state of the conceptual and terminological system of metrological science, *Al'manac of Modern Metrology*, 2016, no. 3 (8), pp. 9–25. (In Russ.)
2. Aslanyan E. G., *Measurement Techniques*, 2005, vol. 48, № 1, pp. 57–63. <https://doi.org/10.1007/s11018-005-0100-6>
3. Doynikov A. S., *Lekcii po metrologii [Lectures on metrology]*, Mendeleev, FSUE "VNIIFTRI" Publ., 2018, 292 p. (In Russ.)
4. Germak A., Herrmann K., Low S., *Metrologia*, 2010, vol. 47, no. 2, pp. 59–66. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/47/2/S07>
5. Germak A., Origlia C., Analysis and estimation of possible large systematic error in Brinell hardness measurements, *Proceedings of Hardmeko 2007*, Tsukuba, Japan, 19–21 November 2007, pp. 76–80.
6. Hattori K., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1065, no. 6, 062013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/6/062013>
7. Aslanyan A., Aslanyan E., Oboznyi E., Galat E., Dovzhenko Y., Zhamanbalin M., *Metrologia*, 2020, vol. 57, no. 1A, 07003. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/07003>
8. Aslanyan E., Menelao F., Herrmann K., Aslanyan A., Pivovarov V., Galat E., Dovzhenko Y., Zhamanbalin M., *Metrologia*, 2013, vol. 50, no. 1A, 07015. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/50/1A/07015>
9. Herrmann K., *Metrologia*, 2006, vol. 43, no. 1A, 07010. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/43/1A/07010>
10. Guideline on COOMET supplementary comparison evaluation COOMET R/GM/19:2016, available at: http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2016/5/21XQGO.pdf (accessed: 10.06.2021).

Статья поступила в редакцию 13.05.2021; принята к публикации 15.06.2021.

Научная статья

УДК 543.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-25-29>

Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 1. Международная практика по установлению прослеживаемости сертифицированных значений стандартных образцов

Сергей Викторович Медведевских¹, Егор Павлович Собина², Ольга Николаевна Кремлева^{3✉}, Мария Юрьевна Медведевских⁴, Алена Вячеславовна Собина⁵, Наталия Сергеевна Тараева⁶

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, s.v.medvedevskikh@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

^{2, 3, 4, 5, 6} Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева», Екатеринбург, Россия

²sobina_egor@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8489-2437>

³kremleva@uniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6003-040X>

⁴lab241@uniim.ru, <https://publons.com/researcher/2119462/mary-medvedevskikh/>

⁵sobinaav@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5873-7326>

⁶taraeva@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8474-6621>

Аннотация. Увеличение числа национальных средств передачи единиц величин с установленными показателями метрологической прослеживаемости в международных организациях – актуальное направление развития для многих стран, поскольку способствует решению глобальной задачи сопоставимости результатов измерений, полученных для различных объектов в разное время в разных точках земного шара, а также свидетельствует о высоком уровне качества измерительных возможностей организации и страны. Освещены вопросы установления метрологической прослеживаемости результатов физико-химических измерений. Описана международная практика по установлению прослеживаемости сертифицированных значений стандартных образцов. Дан краткий обзор основных международно признанных концепций демонстрации метрологической прослеживаемости стандартных образцов.

Ключевые слова: метрологическая прослеживаемость, сертифицированные стандартные образцы, эталоны, первичные референтные методики измерений, межлабораторные сличения

Для цитирования: Медведевских С. В., Собина Е. П., Кремлева О. Н., Медведевских М. Ю., Собина А. В., Тараева Н. С. Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 1. Международная практика по установлению прослеживаемости сертифицированных значений стандартных образцов // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 25–29. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-25-29>

The question of metrological traceability of COOMET reference materials. Pt. 1. International practice on traceability establishment of reference materials' certified values

Sergey V. Medvedevskikh¹, Egor P. Sobina², Olga N. Kremleva^{3✉}, Maria Yu. Medvedevskikh⁴, Alena V. Sobina⁵, Nataliya S. Taraeva⁶

¹ D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, s.v.medvedevskikh@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

^{2, 3, 4, 5, 6} UNIIM – Affiliated Branch of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Ekaterinburg, Russia

²sobina_egor@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8489-2437>

³kremleva@uniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-6003-040X>

⁴lab241@uniim.ru, <https://publons.com/researcher/2119462/mary-medvedevskikh/>

⁵sobinaav@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5873-7326>

⁶taraeva@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8474-6621>

Abstract. The multiplication of national units transfer instruments with established values of metrological traceability in international organisations is one of the most actual development directions for a large number of countries, inasmuch as this direction contributes to the solution of a global problem of measurement results comparability which were received for various objects in different times in different parts of the world as well as indicates the high quality of measuring capabilities of an organisation or a country. The paper contains issues of establishment of metrological traceability of results of physicochemical measurements. The international practice on traceability establishment of reference materials' certified values is described in the work. The authors also provided a brief overview of internationally accepted fundamental concepts of reference materials metrological traceability demonstration.

Keywords: metrological traceability, certified reference materials, measurement standards, primary reference measurement procedures, interlaboratory comparisons

Введение. Демонстрация национальной метрологической прослеживаемости результатов измерений во многом определяет значимость и признание страны в мире, её потенциал в создании новых технологий, научных и инновационных направлений. По сути, это признание высшим уровнем метрологического сообщества важности целостности измерений для современной общественной жизни и определённого уровня доверия, необходимого для поддержания социально-экономической деятельности страны.

Проблемами установления метрологической прослеживаемости результатов измерений занимаются многие международные организации, в частности Международное бюро мер и весов (МБМВ), Международная организация законодательной метрологии, Международная организация по стандартизации (ИСО), Международная организация по аккредитации лабораторий (ИЛАК), Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений (KOOMET) и др.

Основные подходы к демонстрации метрологической прослеживаемости результатов измерений регламентированы признанными в метрологическом сообществе разных стран международными документами: ISO/IEC 17025:2017 "General requirement for the competence of testing and calibration laboratories", ISO 17034:2016 "General requirements for the competence of reference material producers", ISO Guide 30:2015 "Reference materials – Selected terms and definitions", ISO Guide 31:2015 "Reference materials – Contents of certificates, labels and accompanying documentation", ISO Guide 33:2015 "Reference materials – Good practice in using reference materials", ISO Guide 35:2017 "Reference materials – Guidance for characterization and assessment of homogeneity and stability", ILAC P10:07/2020 "ILAC Policy on metrological traceability of measurement results", ISO 17511:2020 "In vitro diagnostic medical devices – Requirements for establishing metrological traceability of values assigned to calibrators, trueness control materials and human samples", ISO 17511:2020 "In vitro diagnostic medical devices – Requirements for establishing metrological traceability of values assigned to calibrators, trueness control materials and human samples". Вопросы, связанные с демонстрацией метрологической прослеживаемости результатов измерений в различных областях промышленности, широко освещены в литературе [1–9].

Зачастую единственный способ для испытательных и калибровочных лабораторий продемонстрировать метрологическую прослеживаемость результатов измерений заключается в применении стандартных образцов (СО), аттестованные значения которых должны прослеживаться к некоторой основе для сравнения – опорной точке, реперу,

эталону. Многие исследователи и технические эксперты в области метрологии проявляют интерес к разработке новых и совершенствованию существующих методик измерений, основанных на метрологических принципах. В настоящее время реализовать метрологическую прослеживаемость можно только при обеспечении на глобальной основе передачи единицы величины от средств измерений к Международной системе единиц (СИ) или международно признанным артефактам, или первичным референтным методикам измерений. Наиболее доступными и одновременно мобильными средствами передачи являются СО. Использование СО как средства для обеспечения метрологической прослеживаемости к СИ привело к значительному развитию отрасли разработки и выпуска СО в последние годы как в России, так и за рубежом. Рынок СО активно развивается. Но за ускоренным созданием номенклатуры СО кроется проблема обеспечения их метрологической прослеживаемости.

Цель статьи – провести сравнительный анализ различных международных практик по установлению метрологической прослеживаемости СО.

Различные трактовки понятия «метрологическая прослеживаемость». Определение понятия «метрологическая прослеживаемость» встречается в нескольких основополагающих международных документах: ISO 17034:2016, ISO Guide 30:2015, ILAC P10:07/2020, ISO 17511:2020 и JCGM 200:2008 "International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)". Согласно Международному словарю по метрологии (VIM) «метрологическая прослеживаемость – свойство **результата измерения**, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с основой для сравнения через документированную непрерывную цепь **калибровок**, каждая из которых вносит вклад в **неопределённость измерений**... ПРИМЕЧАНИЕ 1. В этом определении «основой для сравнения» может быть определение **единицы измерения** через её практическую реализацию, или **методика измерений**, включающая единицу измерения для величин, отличных от **порядковых**, или **эталон**».

В целом ИСО, как и Комитет по стандартным образцам – ИСО/ПЕМКО, в практике и разработанных документах придерживается термина, представленного в JCGM 200:2008. В стандарте ISO 17511:2020 (одном из международных стандартов по лабораторной и клинической медицине) также используется термин «метрологическая прослеживаемость», определённый по JCGM 200:2008.

При этом в национальных нормативных документах в части законодательной метрологии понятие «метрологическая прослеживаемость» трактуется несколько иначе, например в Федеральном законе РФ от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (в редакции от 21.07.2014 № 254-ФЗ) «прослеживаемость – свойство эталона единицы величины, средства измерений или результата измерений, заключающееся в документально подтвержденном установлении их связи с **государственным первичным эталоном** или **национальным первичным эталоном** иностранного государства **соответствующей единицы величины** посредством сличения эталонов единиц величин, поверки, калибровки средств измерений». Из чего следует, что законодательная метрология РФ в части соответствия единицы величины трактует установление метрологической прослеживаемости более строго, делая акцент на иерархическую схему калибровок СИ до первичного эталона именно этой единицы величины.

Далее проанализируем несколько международно признанных практик (в рамках МБМВ, ИСО, ИЛАК) по обеспечению метрологической прослеживаемости СО.

Обеспечение метрологической прослеживаемости согласно практике МБМВ. Создание единых международно признанных эталонов – задача национальных метрологических институтов. Во главе доказательной базы метрологической прослеживаемости к единицам СИ находятся международные ключевые сличения эталонов, на основе которых заявляются и признаются калибровочные и измерительные возможности национальных метрологических институтов (НМИ) в рамках МБМВ в соответствии с соглашением о взаимном признании CIPM MRA (CIPM MRA documents. Bureau international des poids et mesures. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bipm.org/en/cipm-mra/cipm-mra-documents>). Соглашение CIPM MRA между НМИ служит технической основой для обеспечения взаимного признания национальных измерительных эталонов и признания действительности сертификатов о калибровке и измерениях, выданных НМИ. В области химии на международном уровне технической основой, как правило, являются не эталоны, а референтные методики измерений, которые реализованы в соответствующем НМИ (на уровне Консультативного комитета по количеству вещества МБМВ рассматриваются в основном рациональные, реже эмпирические методы, при этом предпочтение отдаётся первичным методам измерений). В остальном признание измерительных и калибровочных возможностей в области химии в соответствии с соглашением CIPM MRA осуществляется так же, как в классических видах измерений.

Сведения обо всех признанных калибровочных и измерительных возможностях по разным видам измерений представлены в Базе данных ключевых сличений KCDB 2.0 (База данных ключевых сличений KCDB. [Электронный ресурс]. URL: <http://kcdb.bipm.org>). В KCDB 2.0 содержится информация об участниках соглашения CIPM MRA, о результатах сличений (ключевых и дополнительных), а также о калибровочных и измерительных возможностях (СМС), прошедших экспертную оценку.

В области измерений количества вещества метрологическая прослеживаемость, как правило, реализуется с применением СО НМИ, которые обеспечивают калибровочный сервис НМИ. В деятельности МБМВ признаются и учитываются результаты измерений, которые прослеживаются к СИ. Причем последнее достигается использованием первичных методов измерений, которые не требуют предварительной калибровки с привлечением единиц величин, характеризующих содержание компонентов в жидких и твердых веществах и материалах, что позволяет применять СО НМИ с наивысшей точностью, называемые первичными стандартными образцами НМИ (или primary reference material, PRM). Характеризация СО из базы данных KCDB 2.0 в качестве средства подтвержденных измерительных возможностей не должна основываться на использовании «коммерческих» (свободно реализуемых на рынке) СО, которые произведены другими аккредитованными или неаккредитованными производителями, кроме НМИ. В рамках МБМВ обычно не решаются вопросы метрологической прослеживаемости для эмпирических методик (например, измерения влажности твердых веществ термogravиметрическим методом), также не предполагается получение опорных значений с привлечением нескольких методов измерений, реализованных в одной или различных лабораториях.

Основное достоинство подхода МБМВ – это создание действительно достоверной демонстрации метрологической прослеживаемости к международно признанным эталонам.

Основным недостатком данного подхода является большая длительность процесса создания национальных первичных эталонов и демонстрации признания измерительных и калибровочных возможностей НМИ, вследствие чего НМИ не всегда успевают обеспечить мировую экономику необходимым количеством номенклатуры СО, в то время как развитие технологического парка стран успевает значительно продвинуться вперед.

Обеспечение метрологической прослеживаемости согласно практике ИСО/РЕМКО. Комитет по стандартным образцам ИСО/РЕМКО с учётом трудностей НМИ по созданию обширной номенклатуры СО и многообразия объектов и определяемых компонентов, имеет более широкие (по сравнению с возможностями МБМВ) возможности к демонстрации метрологической прослеживаемости выпускаемых для коммерческого использования СО (в том числе матричных).

Требования к метрологической прослеживаемости в соответствии с документами ISO/IEC 17025:2017, ISO 17034:2016, ISO Guide 30:2015, ISO Guide 31:2015, ISO Guide 33:2015, ISO Guide 35:2017 разработаны для широкого круга мировых производителей (в том числе аккредитованных) СО. Согласно рекомендациям ISO/TR 16476:2016 “Reference materials – Establishing and expressing metrological traceability of quantity values assigned to reference materials” допускается «горизонтальная прослеживаемость», при которой для демонстрации предполагается один из следующих вариантов: измерения отдельным (первичным) методом в отдельной лаборатории; измерения двумя или более независимыми стандартными методами в одной лаборатории; измерения сетью лабораторий,

использующих один или несколько методов с демонстрируемой точностью; измерения конкретным методом, дающим только оценку значений свойств. Таким образом, в ISO/TR 16476:2016 допускаются измерения сетью лабораторий, а также использование эмпирических методик, и эти обстоятельства должны быть обязательно указаны в сертификате на СО.

Основное достоинство подхода Комитета по стандартным образцам ИСО/РЕМКО состоит в более гибкой и менее затратной (по сравнению с практикой МБМВ) достоверной демонстрацией метрологической прослеживаемости СО. Основным недостатком данного подхода является то, что даже в тех случаях, когда при сертификации СО прослеживаются по отдельности все результаты, полученные от сети лабораторий, совершенно неясными остаются степень и основы сравнения цепи прослеживаемости объединённого результата. Эта проблема значительно усугубляется, если объединяемые результаты отдельных лабораторий прослеживаются к различным основам сравнения или, по меньшей мере, различными путями. К недостаткам также относится более «размытая» прослеживаемость коммерческих СО.

Обеспечение метрологической прослеживаемости согласно практике ИЛАК. Основным документом, определяющим требования к метрологической прослеживаемости в рамках деятельности ИЛАК является международный документ ILAC P10:07/2020. В соответствии с политикой ILAC P10:07/2020 для метрологической прослеживаемости необходима непрерывная цепь калибровок, прослеживаемых к признанным эталонам или СО с установленными значениями неопределённости.

В метрологическом сообществе существует распространённое ошибочное представление о том, что прослеживаемость может обеспечиваться по отношению к какой-то организации (например, как прослеживаемость к определённому НМИ), что в дальнейшем способствует устойчивому неверному пониманию процедуры («природы») прослеживаемости. По мнению авторов настоящей статьи, метрологическая прослеживаемость имеет отношение к референтным значениям эталонов и результатов измерений, а не к организации, которая их предоставляет.

В работе [1] проанализированы формулировки записи утверждений о метрологической прослеживаемости в сертификатах на СО в области чистых веществ, растворов, матричных СО различных производителей. По результатам анализа автор [1] рекомендует при оформлении сертификатов СО включать ссылки на СО НМИ, к которому прослеживается аттестованное значение конкретного СО, при этом не требуется дополнительно расшифровывать пути реализации прослеживаемости указанных СО НМИ.

Политика ILAC P10:07/2020 в отношении метрологической прослеживаемости, которую обеспечивают производители стандартных образцов с помощью сертифицированных СО, заключается в том, что сертифицированные значения, присвоенные СО, устанавливают действительную метрологическую прослеживаемость в следующих случаях:

«4) НМИ производят сертифицированные СО с использованием услуги, которая включена в BIPM KCDB.

или

5) Аккредитованные производители СО производят сертифицированные СО в соответствии с областью их аккредитации, а орган по аккредитации находится в сфере действия Соглашения ILAC или региональных соглашений, признанных ILAC.

или

6) Сертифицированные значения, присвоенные сертифицированным СО, содержатся в базе данных Объединённого комитета по прослеживаемости в лабораторной медицине (JCTLM).

Признавая, что аккредитация производителей СО все еще развивается и у аккредитованных производителей СО могут отсутствовать сертифицированные СО, то в случае, когда сертифицированные СО производятся неаккредитованными производителями, аккредитованные организации должны продемонстрировать, что сертифицированные СО были предоставлены компетентным производителем СО и что они пригодны для своего предполагаемого использования.

Когда метрологическая прослеживаемость к единицам СИ технически невозможна, аккредитованная организация несет ответственность за:

7a) Выбор способа по соответствию требованиям метрологической прослеживаемости путем использования сертифицированных значений сертифицированных СО, предоставленных компетентным производителем.

или

7b) Документирование результатов подходящего сличения с референтными методиками выполнения измерений, установленными методами или согласованными стандартами (эталонами), которые четко описаны и признаны в качестве обеспечивающих результаты измерений, пригодных для их предполагаемого использования. Органу по аккредитации следует оценить доказательства этого сличения.

Примечание 4. Если метрологическая прослеживаемость только к единицам СИ не уместна или не подходит для применения, следует выбрать четко определенную измеряемую величину. Следовательно, определение метрологической прослеживаемости включает в себя как подтверждение идентичности измеренного свойства, так и сличение результатов с соответствующим принятым эталоном. Сличение осуществляется путем обеспечения надлежащей валидации и/или верификации методик измерений, надлежащей калибровки измерительного оборудования и установления достаточного контроля за условиями измерения (например, условиями окружающей среды), что необходимо для обеспечения достоверного результата.

Примечание 5. Избыточные материалы для испытаний часто можно получить у провайдеров проверки квалификации. Необходимо проверить, может ли провайдер проверки квалификации предоставить дополнительную информацию о стабильности, чтобы продемонстрировать текущую стабильность значения свойства и матрицы материала для испытаний. Если это невозможно, эти материалы для испытаний нельзя рассматривать в качестве альтернативного способа обеспечения достоверности результатов».

Таким образом, ИЛАК, руководствуясь принципами МБМВ, учитывает проблематику обеспечения испытательных и калибровочных лабораторий только СО, произведенными НМИ. При этом допускается применение СО других производителей, но с обязательным условием демонстрации метрологической прослеживаемости. ИЛАК также поддерживает подходы к демонстрации метрологической прослеживаемости, рекомендованные документами ИСО/РЕМКО, однако чётко не определяет опорные точки, до которых устанавливается метрологическая прослеживаемость, что приводит к неоднозначным суждениям Органа по аккредитации при оценивании метрологической прослеживаемости СО.

Сравнение различных подходов к установлению метрологической прослеживаемости. Из анализа трёх рассмотренных критериев метрологической прослеживаемости, применяемых МБМВ, ИСО/РЕМКО и ИЛАК, следует, что несмотря на общий методологический подход, различаются идеологии подхода к установлению метрологической прослеживаемости. Основные различия идеологии наблюдаются, когда невозможно проследить результаты измерений до системы единиц СИ и (или) когда используются эмпирические методы измерений или межлабораторный эксперимент при характеристике СО.

Заключение. При описании международной практики по установлению прослеживаемости сертифицированных значений СО показаны различия в определениях термина «метрологическая прослеживаемость», приведённых в международных и национальных документах. В результате краткого сравнительного обзора основных международно признанных концепций демонстрации метрологической прослеживаемости СО представлены достоинства и недостатки концепций МБМВ, ИСО и ИЛАК.

Список литературы

1. Sargent M., *Accreditation and Quality Assurance*, 2020, vol. 25, pp. 367–372. <https://doi.org/10.1007/s00769-020-01450-8>
2. Do Ceu Ferreira M., Matos A., Leal R. P., *Accreditation and quality assurance*, 2015, vol. 20, pp. 457–464. <https://doi.org/10.1007/s00769-015-1149-9>
3. Brown R. J. C., Andres H., *Accreditation and quality assurance*, 2020, vol. 25, pp. 161–166. <https://doi.org/10.1007/s00769-020-01424-w>
4. Velychko O., Gordiyenko T., *Standards, methods and solutions of metrology*, Luigi Cocco, IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84853>
5. Kyriacos T., Sappho M., Metrological requirements for accredited laboratories, *17th International congress of metrology*, Paris, France, September 21–24 2015, Paris, EDP Sciences, 2015. <https://doi.org/10.1051/metrology/201502016>

Paris, France, September 21–24 2015, Paris, EDP Sciences, 2015. <https://doi.org/10.1051/metrology/201502016>

6. Bulska E., *Metrology in chemistry. Lecture notes in chemistry*, 2018, vol. 101, pp. 35–51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99206-8_4
7. Miller W. G., Greenberg N., Budd J., Delatour V., *IFCC Working Group on Commutability in Metrological Traceability, Clinica chimica acta*, 2021, vol. 514, pp. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2020.12.021>
8. Панева В. И. Роль межлабораторных сравнительных испытаний в обеспечении качества аналитических измерений, используемых в области оценки соответствия // Стандартные образцы. 2009. № 3. С. 7–14.
9. Кутяйкин В. Г., Горбачев П. А., Гейгер Е. Ю., Савровский К. К. Метрологическая прослеживаемость результатов испытаний // Компетентность. 2020. № 7. С. 30–36. <https://doi.org/1024411/1993-8780-2020-10706>

References

1. Sargent M., *Accreditation and Quality Assurance*, 2020, vol. 25, pp. 367–372. <https://doi.org/10.1007/s00769-020-01450-8>
2. Do Ceu Ferreira M., Matos A., Leal R. P., *Accreditation and quality assurance*, 2015, vol. 20, pp. 457–464. <https://doi.org/10.1007/s00769-015-1149-9>
3. Brown R. J. C., Andres H., *Accreditation and quality assurance*, 2020, vol. 25, pp. 161–166. <https://doi.org/10.1007/s00769-020-01424-w>
4. Velychko O., Gordiyenko T., *Standards, methods and solutions of metrology*, Luigi Cocco, IntechOpen, 2019. <https://doi.org/10.5772/intechopen.84853>
5. Kyriacos T., Sappho M., Metrological requirements for accredited laboratories, *17th International congress of metrology*, Paris, France, September 21–24 2015, Paris, EDP Sciences, 2015. <https://doi.org/10.1051/metrology/201502016>
6. Bulska E., *Metrology in chemistry. Lecture notes in chemistry*, 2018, vol. 101, pp. 35–51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99206-8_4
7. Miller W. G., Greenberg N., Budd J., Delatour V., *IFCC Working Group on Commutability in Metrological Traceability, Clinica chimica acta*, 2021, vol. 514, pp. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2020.12.021>
8. Paneva V. I., The role of interlaboratory comparison tests in the quality assurance of analytical measurements, used in conformity assessment, *Reference Materials*, 2009, no. 3, pp. 7–14. (In Russ.)
9. Kutyaykin V. G., Gorbachev P. A., Geyger E. Yu., Savrovskiy K. K. *Competency (Russia)*, 2020, no. 7, pp. 30–36. (In Russ.) <https://doi.org/1024411/1993-8780-2020-10706>

Статья поступила в редакцию 24. 05. 2021; принята к публикации 10.06.2021.

Научная статья

УДК 543.08

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-30-37>

Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 2. Характеризация стандартных образцов

Сергей Викторович Медведевских¹, Егор Павлович Собина², Ольга Николаевна Кремлева^{3✉},
Мария Юрьевна Медведевских⁴, Алена Вячеславовна Собина⁵, Наталия Сергеевна Тараева⁶

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия, s.v.medvedevskikh@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

^{2, 3, 4, 5, 6} Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева», Екатеринбург, Россия

²sobina_egor@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8489-2437>

³kremleva@uniim.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6003-040X>

⁴lab241@uniim.ru, <https://publons.com/researcher/2119462/mary-medvedevskikh/>

⁵sobinaav@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5873-7326>

⁶taraeva@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8474-6621>

Аннотация. Рассмотрен принцип установления метрологической прослеживаемости стандартных образцов в рамках Технического комитета ТК 1.12 «Стандартные образцы» Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений (КООМЕТ). Приведены конкретные примеры создания стандартных образцов КООМЕТ. Рассмотрены подходы к демонстрации метрологической прослеживаемости стандартных образцов при различных способах их характеризации – применение государственных эталонов, использование межлабораторного эксперимента, а также применение первичной референтной методики измерений для характеризации стандартных образцов в отсутствие государственных эталонов единиц величин.

Ключевые слова: метрологическая прослеживаемость, сертифицированные стандартные образцы, эталоны, первичные референтные методики измерений

Для цитирования: Медведевских С. В., Собина Е. П., Кремлева О. Н., Медведевских М. Ю., Собина А. В., Тараева Н. С. Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 2. Характеризация стандартных образцов // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 30–37. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-30-37>

The question of metrological traceability of COOMET reference materials. Pt. 2. Reference materials characterization

Sergey V. Medvedevskikh¹, Egor P. Sobina², Olga N. Kremleva^{3✉}, Maria Yu. Medvedevskikh⁴,
Alena V. Sobina⁵, Nataliya S. Taraeva⁶

¹ D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia, s.v.medvedevskikh@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3084-1612>

^{2, 3, 4, 5, 6} UNIIM – Affiliated Branch of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Ekaterinburg, Russia

²sobina_egor@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8489-2437>

³kremleva@uniim.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-6003-040X>

⁴lab241@uniim.ru, <https://publons.com/researcher/2119462/mary-medvedevskikh/>

⁵sobinaav@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5873-7326>

⁶taraeva@uniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8474-6621>

Abstract. The concept of reference materials metrological traceability establishment within the framework of Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions (COOMET) Technical Committee 1.12 “Reference Materials” (TC 1.12) is overviewed. Particular cases of COOMET Reference Materials development are provided. The authors considered approaches to demonstrate a metrological traceability of reference materials with different types of their characterisation, e. g., appliance of national measurement standards, or performance of interlaboratory comparison testing, or usage of primary reference measurement procedure for reference materials characterisation if a state measurement standard for units is absent.

Keywords: metrological traceability, certified reference materials, standards, primary reference measurement procedures

Введение. Одной из метрологических организаций, объединяющих научные метрологические институты по региональному признаку, является Евро-Азиатское сотрудничество государственных метрологических учреждений (KOOMET). KOOMET подразделяется на Технические комитеты по определённым видам измерений. От аналогичных региональных организаций KOOMET отличается структурно, в частности, в его состав с 1992 г. входит Технический комитет ТК 1.12 «Стандартные образцы». Главной целью работы ТК 1.12 является сотрудничество между национальными метрологическими институтами (НМИ) и заинтересованными производителями стандартных образцов (СО) в части постановки тем совместных разработок и применения СО веществ и материалов.

Для демонстрации метрологической прослеживаемости СО в ТК 1.12 успешно объединены рассмотренные в [1] международно признанные способы установления метрологической прослеживаемости. Результаты разработки и установления метрологической прослеживаемости СО заслушиваются на ежегодных встречах ТК 1.12 и применяются при совместной разработке. Метрологическая прослеживаемость СО, рекомендуемых для признания в качестве СО KOOMET, должна соответствовать практике Международного бюро мер и весов (МБМВ).

Такие СО подразделяются на условные категории:

СО из KCDB 2.0 МБМВ;

СО, охарактеризованные с применением эталонов единиц величин, находящихся в НМИ;

СО, охарактеризованные с использованием референтных и первичных референтных методик измерений;

СО, охарактеризованные на основе рациональных и эмпирических методов (например, сорбционные свойства, влажность твёрдых веществ, показатели состава и качеств нефтепродуктов);

СО, охарактеризованные по результатам межлабораторных экспериментов с обязательным участием одного из эталонов (или первичных референтных или референтных методик измерений) в одном из НМИ.

При характеристике СО по данным межлабораторного эксперимента организациям-участникам рекомендуется использовать единую основу для сравнения, что можно реализовать, например, путём рассылки СО чистых веществ или их растворов для калибровки при создании матричных СО. Охарактеризованные данным способом СО рекомендуются для признания в качестве СО KOOMET при условии, что сертифицированные значения СО, установленные при межлабораторном эксперименте, согласуются с результатами измерений НМИ в пределах заявленных неопределённостей. В случае значимых отклонений результатов межлабораторного эксперимента от результатов НМИ, смещение необходимо учесть при расчёте неопределённости сертифицированных значений СО.

Дополнительно ТК 1.12 разработан документ, регламентирующий сличения СО KOOMET, R/RM/29:2016 "COOMET Recommendation. The content and procedure of work on reference material comparison within COOMET". Этот документ позволяет демонстрировать эквивалентность СО разных НМИ, и в случае, если один из НМИ уже имеет подтверждённые

калибровочные и измерительные возможности (СМС-строки) в Базе данных МБМВ, то производитель может использовать данный отчёт как документальное подтверждение метрологической прослеживаемости выпускаемых СО.

Цель настоящей статьи – на примере разработанных СО KOOMET и кандидатов в СО KOOMET (российских СО производства УНИИМ – филиала ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» и СО производства ОАО «Красцветмет») рассмотреть различные подходы ТК 1.12 к демонстрации метрологической прослеживаемости СО различных объектов.

Применение государственного эталона для характеристики стандартных образцов и признание СО из базы данных МБМВ в качестве СО KOOMET. Визитной карточкой УНИИМ являются серийно выпускаемые СО состава чистых химических веществ, массовая доля основного компонента в которых установлена методом кулонометрии с применением Государственного первичного эталона единиц массовой (молярной, атомной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твёрдых веществах и материалах на основе кулонометрии ГЭТ 176-2019 [2, 3]. Метод кулонометрии рекомендован Консультативным комитетом по количеству вещества – метрология в химии и биологии в качестве первичного метода измерений [4] и позволяет установить прослеживаемость результатов измерений содержания компонентов в веществах и материалах к основным единицам Международной системы единиц (СИ) – килограмму, секунде, амперу. По результатам успешного участия в международных ключевых сличениях в базу данных МБМВ внесены СМС-строки кулонометрических установок из состава ГЭТ 176-2019 и ещё 2 СМС-строки находятся на межрегиональной экспертизе.

В настоящее время в УНИИМ с использованием метода кулонометрии выпускается 17 утверждённых типов СО: восемь типов СО состава чистых солей металлов; по два типа СО состава чистых металлов, твёрдых кислот, растворов жидких и твёрдых чистых веществ; три типа СО состава элементов в твёрдой матрице для рентгенофлуоресцентного анализа (табл. 1, 2, где D , U – соответственно диапазон и расширенная неопределённость при $k=2$ сертифицированных значений СО). Для характеристики СО состава солей щёлочных металлов, твёрдых и жидких кислот, щёлочей и их растворов применяется метод кулонометрического титрования (в 2022 г. запланирована разработка СО состава раствора щёлочи), для характеристики СО состава металлов с переходными степенями окисления и их соединений – метод кулонометрии с контролируемым потенциалом. Пять из перечисленных выше СО состава чистых веществ внесены в Базу данных калибровочных и измерительных возможностей МБМВ, два типа (ГСО 2216-81, ГСО 2215-81) признаны в качестве СО KOOMET.

Номенклатура СО состава чистых солей металлов подобрана таким образом, чтобы охватить все типы химических реакций, реализуемых в титриметрии – кислотно-основные, окислительно-восстановительные, осаждения и комплексобразования. Эти СО высокой степени чистоты стабильны по химическому и изотопному составу. Применение СО состава чистых солей металлов регламентировано межгосударственными стандартами по приготовлению титрованных растворов:

Таблица 1

ГСО состава чистых химических веществ и их растворов, выпускаемые УНИИМ с применением ГЭТ 176-2019 и метрологически прослеживаемые к единицам системы СИ

Тип реализуемой реакции	Номер ГСО в реестре РФ/КООМЕТ	ГСО состава	<i>D</i>	<i>U</i> , %
Аттестация методом кулонометрического титрования				
Нейтрализации (кислотно-основная)	2216-81/0113-2017-RU	калия фталевокислого кислого 1-го разряда	99,95–100,00 %	0,02
	10450-2014	массовой доли карбоната натрия в карбонате натрия высокой чистоты	99,95–100,00 %	0,03
	9654-2010	раствора соляной кислоты	0,099–0,110 моль/дм ³	0,05 отн.
	10498-2014	сульфаминовой кислоты	99,9–100,0 %	0,03
Окисления-восстановления	2215-81/0112-2017-RU	калия двухромовокислого 1-го разряда	99,95–100,00 %	0,02
	10992-2017	раствора калия двухромовокислого	0,098–0,102 моль/дм ³	0,05 отн.
	3219-85	натрия щавелевокислого 1-го разряда	99,9–100,0 %	0,05
Комплексообразования	2960-84	трилона Б 1-го разряда	99,7–100,0 %	0,05
	9655-2010	этилендиаминтетрауксусной кислоты	99,7–100,0 %	0,05
Осаждения	4391-88	натрия хлористого 1-го разряда	99,9–100,0 %	0,03
	9969-2011	калия хлористого	99,5–100,0 %	0,03
Аттестация методом кулонометрии с контролируемым потенциалом				
Окисления-восстановления	10275-2013	свинца азотнокислого	МДОК нитрата свинца 99,60–100,00 % и свинца 62,30–62,56 %	0,10
	10800-2016	меди высокой чистоты (Cu СО УНИИМ)	99,95–100,00 %	0,03
	10816-2016	железа высокой чистоты (Fe СО УНИИМ)	99,95–100,00 %	0,03

Таблица 2

СО массовой доли элементов в твёрдой матрице для метрологического обеспечения рентгенофлуоресцентного анализа, выпускаемые УНИИМ с применением ГЭТ 176-2019 и метрологически прослеживаемые к единицам СИ

Номер ГСО	ГСО массовой доли элементов в твёрдой матрице	Массовая доля	<i>D</i> , %	<i>U</i> , %
10934-2017	Натрия и хлора (NaCl-ТМ СО УНИИМ)	Натрия	38,8–39,8	0,1
		Хлора	60,2–61,2	0,1
10991-2017	Свинца (Pb-ТМ СО УНИИМ)	Свинца	0,9–1,1	3,0
11036-2018	Железа (Fe-ТМ СО УНИИМ)	Железа	0,9–1,1	3,0

для кислотно-основного титрования по ГОСТ 25794.1-83 «Реактивы. Методы приготовления титрованных растворов для кислотно-основного титрования (с Изменением № 1)», для окислительно-восстановительного титрования по ГОСТ 25794.2-83 «Реактивы. Методы приготовления титрованных растворов для окислительно-восстановительного титрования (с Изменением № 1)», для титрования осаждением по ГОСТ 25794.3-83 «Реактивы. Методы приготовления титрованных растворов для титрования осаждением, неводного титрования и других методов». Общие требования к методикам измерений массовой доли основного

вещества реактивов и особо чистых веществ титриметрическими методами установлены в национальном стандарте ГОСТ Р 8.600-2003 «ГСИ. Методики выполнения измерений массовой доли основного вещества реактивов и особо чистых веществ титриметрическими методами. Общие требования». Таким образом, небольшая номенклатура СО состава чистых солей металлов, аттестованных первичным методом кулонометрического титрования, обеспечивает прослеживаемость результатов аналитических измерений методом титриметрии. Титриметрический метод анализа до сих пор широко применяется в лабораторной практике за счёт хорошей изученности, экспрессности, простоте реализации, отсутствия дорогостоящих сложных инструментальных приборов. В настоящее время более 80 межгосударственных и национальных стандартов, регламентирующих методы испытаний продукции с использованием методов титриметрии, обеспечивают выполнение требований 12 Технических регламентов, в том числе Таможенного союза.

СО состава чистых солей металлов, выпускаемые с применением ГЭТ 176-2019, требуются при установлении метрологических характеристик СО состава растворов ионов металлов и неметаллов, которые используются для контроля точности

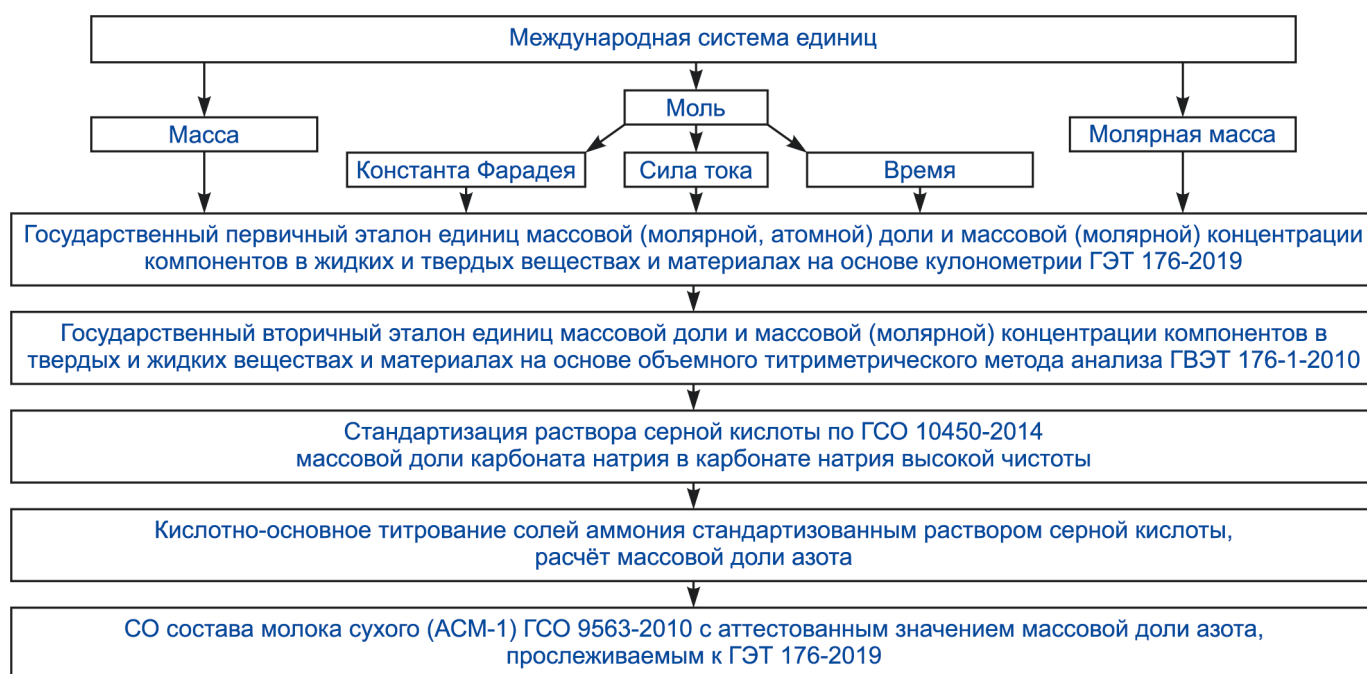


Рис. 1. Схема реализации метрологической прослеживаемости аттестованного значения стандартного образца к Государственному первичному эталону единиц массовой (молярной, атомной) доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в жидких и твердых веществах и материалах на основе кулонометрии ГЭТ 176-2019 на примере характеристики стандартного образца состава молока сухого (АСМ-1) ГСО 9563-2010

Fig. 1. Implementation scheme of metrological traceability of the RM certified value to the State Primary Standard of units of mass (molar, atomic) fraction and mass (molar, atomic) concentration of components in liquid and solid substances and materials based on coulometry GET 176-2019 on the example of characterization of dried milk powder RM GSO 9563-2010 (ASM-1)

методик количественного химического анализа и поверки (калибровки) ионных хроматографов, спектрофотометрических, атомно-абсорбционных, масс-спектрометрических и других универсальных анализаторов состава различных объектов. Согласно требованиям международного стандарта ISO 17034:2016 "General requirements for the competence of reference material producers" производители обязаны обеспечить прослеживаемость аттестованных значений выпускаемых СО. Эту задачу можно решить применением аттестованных СО (значения которых установлены первичным методом кулонометрии на ГЭТ 176-2019) для определения метрологических характеристик СО состава раствора ионов. Поэтому аккредитованные и (или) стремящиеся обеспечить высокое качество своей продукции производители СО состава растворов ионов являются постоянными потребителями указанных выше СО состава чистых веществ.

СО состава чистых солей металлов, аттестованные на ГЭТ 176-2019, применяют также для установления аттестованных значений матричных СО. На рис. 1 представлена схема реализации метрологической прослеживаемости аттестованного значения массовой доли азота к ГЭТ 176-2019 при характеристике СО состава молока сухого (АСМ-1) ГСО 9563-2010.

УНИИМ оценивает задачу обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений величин, характеризующих состав веществ и материалов, как приоритетную,

и в дальнейшем планирует расширять номенклатуру СО с подтвержденной прослеживаемостью.

Применение первичных референтных методик измерений для характеристики СО. Для оценки измерительных возможностей в области измерений показателей пищевой ценности продуктов питания и продовольственного сырья специалистами УНИИМ регулярно проводятся сличения в рамках КООМЕТ. В 2006–2007 гг. проведены пилотные сличения в области измерений массовой доли влаги в зерне по темам КООМЕТ 379/RU/06 с участием России, Белоруссии, Украины, Германии. В 2008–2009 гг. проведены пилотные сличения в области измерений влажности ячменя по теме КООМЕТ 436/RU/08 с участием России, Белоруссии, Украины, Германии, Швеции. Опыт проведения сличений использован при разработке СО состава зерна и продуктов его переработки (СО массовой доли влаги зерна 1-го разряда ГСО 8989-2008, СО массовой доли влаги зерна 2-го разряда ГСО 8990-2008, СО массовой доли влаги в продуктах переработки зерна ГСО 9564-2010). Аттестованное значение массовой доли влаги установлено на Государственном первичном эталоне единиц массовой доли, массовой (молярной) концентрации воды в твердых и жидких веществах и материалах ГЭТ 173-2017. ГСО 8990-2008 был признан в качестве межгосударственного СО (МСО 1781:2012) и допущен к применению на территории стран-участниц Межгосударственного совета по стандартизации, метрологии и сертификации.

Таблица 3

**Метрологические характеристики ГСО 11086-2018 / ГСО 11091-2018
и ГСО 11144-2018 / ГСО 11147-2018**

Наименование СО	Массовые доли	D , %	$\pm\Delta$, %
СО состава сухих молочных продуктов (набор АСМ-2 СО УНИИМ) ГСО 11086-2018 / ГСО 11091-2018	Влаги	2,00–10,00	0,08–0,12
	Азота	0,20–11,00	0,03
	Белка	1,2–70,0	0,2
	Жиры	0,10–80,00	0,10–0,25
СО состава каши зерновой сухой для детского питания (набор КС-1 СО УНИИМ) ГСО 11144-2018 / ГСО 11147-2018	Влаги	2,00–10,00	0,08–0,12
	Азота	0,50–2,50	0,03
	Белка	3,00–16,00	0,20
	Жиры	0,50–12,00	0,25

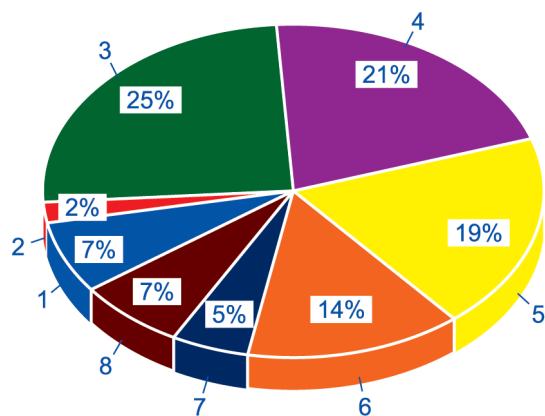


Рис. 2. Распределение стандартных образцов состава пищевых продуктов, продовольственного сырья и пищевых добавок, необходимых для метрологического обеспечения результатов измерений показателей идентификации пищевой продукции на соответствие требованиям Технических регламентов Таможенного союза:

1 – мясная продукция (ТР ТС 034/2013); 2 – продукты яичные (ТР ТС 021/2011); 3 – молочная продукция (ТР ТС 033/2013); 4 – зерно, зернопродукты, кормовые компоненты (ТР ТС 015/2011); 5 – детское питание (ТР ТС 027/2012); 6 – масличные (ТР ТС 024); 7 – крахмалопродукты (ТР ТС 021/2011); 8 – пищевые добавки (ТР ТС 029)

Fig. 2. Distribution of reference materials of food products, food raw materials, and food additives, which are necessary for metrological support of measurement results of food products identification indicators for compliance with the requirements of Customs Union Technical Regulations: 1 – meat products (TR CU 034/2013); 2 – egg products (TR CU 021/2011); 3 – dairy products (TR CU 033/2013); 4 – grain, grain products, feed components (TR CU 015/2011); 5 – baby food (TR CU 027/2012); 6 – oilseeds (TR CU 024); 7 – starch products (TR CU 021/2011); 8 – food additives (TR CU 029)

В рамках исследований по созданию Государственного вторичного эталона единиц массовой доли и массовой (молярной) концентрации компонентов в твердых и жидких веществах и материалах на основе объемного титриметрического метода анализа ГВЭТ 176-1-2010 разработаны СО состава зерна и продуктов его переработки ГСО 9734-2010 и СО состава молока сухого (АСМ-1) ГСО 9563-2010 с аттестованными значениями массовой доли влаги, азота и белка. В 2010 г. с использованием ГСО 9563-2010 проведены пилотные сличения в области измерения массовой доли азота в молочных продуктах КООМЕТ 508/RU/10. ГСО 9563-2010,

ГСО 9734-2010 внесены в реестр МСО под номерами 1781:2012 и 1782:2012.

С целью реализации «Стратегии повышения качества пищевой продукции в Российской Федерации до 2030 года», утверждённой распоряжением Правительства РФ № 1364-р от 29 июня 2016 г., с 2018 г., сотрудниками Лаборатории метрологии влагометрии и стандартных образцов УНИИМ проводятся работы по созданию комплекса метрологического обеспечения для средств и методик измерений показателей идентификации и пищевой ценности продуктов питания и продовольственного сырья.

В 2019 г. разработаны и аттестованы первичные референтные методики измерений массовой доли жира (ФР.ПР1.31.2019.00001) и золы (ФР.ПР1.31.2019.00002) в пищевых продуктах и продовольственном сырье. С использованием ГЭТ 173-2017, ГВЭТ 176-1-2010 и указанных первичных референтных методик измерений созданы СО состава сухих молочных продуктов (набор АСМ-2 СО УНИИМ) ГСО 11086-2018 / ГСО 11091-2018 и СО состава каши зерновой сухой для детского питания (набор КС-1 СО УНИИМ) ГСО 11144-2018 / ГСО 11147-2018. Метрологические характеристики СО представлены в табл. 3, где аттестуемые характеристики – массовые доли влаги, азота, белка, жира – приведены в пересчёте на сухое вещество; D , $\pm\Delta$ – соответственно диапазон и погрешность массовых долей.

ГСО 11086-2018 / ГСО 11091-2018 и ГСО 11144-2018 / ГСО 11147-2018 наиболее востребованы для метрологического обеспечения средств и методик измерений показателей пищевой ценности продуктов питания и продовольственного сырья. В настоящее время планируется проведение работ по утверждению данных СО в ранге СО КООМЕТ.

На сегодняшний день лаборатория выпускает более 40 типов СО состава пищевых продуктов, продовольственного сырья и пищевых добавок, необходимых для метрологического обеспечения результатов измерений показателей идентификации пищевой продукции на соответствие требованиям Технических регламентов Таможенного союза (рис. 2).

Аттестованные характеристики СО (массовые доли влаги, жира, азота (белка), золы, углеводов) прослеживаются к ГЭТ 173-2017, ГВЭТ 176-1-2010, первичным референтным методикам измерений ФР.ПР1.31.2019.00001, ФР.ПР1.31.2019.00002, ФР.ПР1.31.2019.00005, ФР.ПР1.31.2019.00009.

СО активно используются при испытаниях в целях утверждения типа, поверке и калибровке средств измерений, аттестации методик измерений, контроле точности результатов измерений.

Концепция разработки СО согласуется с международной моделью пищевого треугольника (AOAC food composition triangle) [5, 6], разработанной Ассоциацией аналитических сообществ АОАС. Данная модель позволяет распределить все пищевые продукты по девяти секторам в зависимости от содержания белков, жиров и углеводов. С целью валидации аналитического метода для большинства продуктов, расположенных в одном секторе, достаточно исследовать одну или две пищевые матрицы из этого сектора.

Параллельно с разработкой комплекса метрологического обеспечения в УНИИМ проводятся работы по признанию на мировом уровне результатов измерений характеристик СО состава пищевых продуктов и продовольственного сырья.

В 2020 г. по итогам успешного участия в международных ключевых сличениях CCQM-K149 УНИИМ подтвердил высокую точность получаемых результатов определения массовой доли азота (белка) и получил новые СМС-строки в Базе данных МБМВ (табл. 4).

Применение государственного первичного эталона на основе измерения методозависимых величин для характеристики СО и признание их в качестве СО КООМЕТ. Важнейшими характеристиками структуры пористых и дисперсных веществ и материалов являются удельные поверхность и объём, а также размер пор [7–10]. В УНИИМ выпускается широкая номенклатура СО сорбционных свойств, производимых с помощью Государственного первичного эталона единиц удельной адсорбции газов, удельной поверхности, удельного объёма пор, размера пор, открытой пористости и коэффициента газопроницаемости твёрдых веществ и материалов ГЭТ 210-2019 и прослеживаемых к нему в соответствии со стратегией характеристики (рис. 3). В табл. 5 приведены аттестуемые характеристики (параметры) СО сорбционных свойств: A – удельная адсорбция газа; S , V – удельные поверхность (метод Брунауэра, Эммета, Тэллера – БЭТ) и объём пор; $D_{cp} = 4V/S$, $D_{пр}$ – соответственно средний и преобладающий диаметры пор.

Из табл. 5 и рис. 3 следует, что удельная адсорбция газов непосредственно прослеживается к единицам системы СИ. Практически важные производные величины – удельные поверхность и объём, а также размер пор – в настоящее время измеряются с высокой точностью газоадсорбционным методом, который описан в международных стандартах ИСО. Для вычисления производных величин в настоящее время используются разные теории, которые приводят к различным результатам. Для обсуждения возможности внесения в Базу данных МБМВ величин, определение которых основано на международных стандартах, была создана рабочая группа, которая подготовила следующие критерии для получения СМС-строк: методозависимая величина должна входить в область деятельности Консультативного комитета по количеству вещества и согласовываться на международном уровне; требуется стабильная основа для сравнения во времени; основной метод для создания иерархической схемы калибровок должен обладать наивысшей точностью (по результатам исследований НМИ). На основе данных критериев

решено, что в Базу данных МБМВ могут быть внесены СМС-строки для удельной адсорбции газов и удельной поверхности, определённые методом Брунауэра, Эммета, Тэллера (БЭТ). СО, приведенные в табл. 5, планируется представить для признания в качестве СО КООМЕТ.

Применение межлабораторного эксперимента для характеристики СО. Наиболее распространёнными областями применения СО состава золота аффинированного являются металлургия и золотоперерабатывающая промышленность. Фундаментальное значение имеет использование СО для градуировки средств измерений, контроля точности результатов измерений, аттестации методик измерений, а также для калибровки и испытаний средств измерений и СО в целях утверждения типа. Исходя из этого ОАО «Красцветмет» в рамках КООМЕТ предложена и зарегистрирована под № 732/RU/17 тема по разработке СО состава золота аффинированного (комплект СО 3лН).

Материал комплекта СО 3лН изготовлен методом плавления на основании шихтовочных данных с последующей механической обработкой. В качестве основы для изготовления материала СО использовалось золото аффинированное с массовой долей основного компонента не менее 99,99 %. Для данного СО были аттестованы массовые доли серебра,

Таблица 4

Измерительные и калибровочные возможности Лаборатории 241 УНИИМ по измерению массовой доли азота

Шифр СМС	Объект	D , %	U_p , %, при $k=2$
VNIIM/241-1.2-1	Глицин	18,47–18,65	0,11–0,15
VNIIM/241-11.4-1	Сухое молоко	1–7	0,03
VNIIM/241-11.4-2	Зерно	1–8	0,04–0,06
VNIIM/241-11.4-3	Яичный порошок	5,6–8,8	0,05
VNIIM/241-11.4-4	Каши зерновые	0,5–3,0	0,03
VNIIM/241-11.4-5	Корма	1,6–4,8	0,05

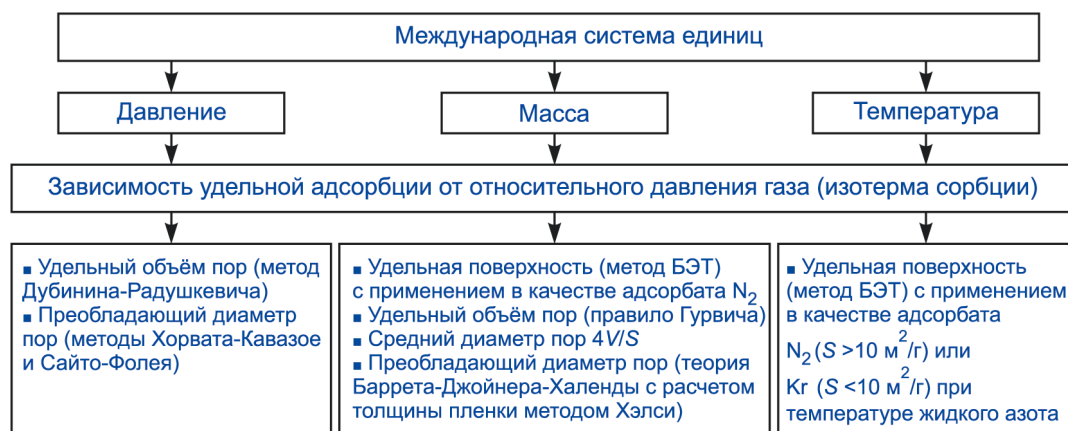


Рис. 3. Схема прослеживаемости измерений сорбционных свойств; БЭТ – метод Брунауэра, Эммета, Тэллера; V , S – удельные объём пор и поверхность соответственно

Fig. 3. Traceability scheme of sorption properties measurement; the BET – method of Brunauer, Emmet, Teller; V , S – specific pore volume and surface, respectively

Таблица 5

Метрологические характеристики СО сорбционных свойств

ГСО			Параметр	D	U, %
Номер	Матрица	Тип пор			
ГСО 10900-2017	SiO ₂	Непористый, D~0	A(Kr), моль/кг S, м ² /г	5·10 ⁻⁴ –2·10 ⁻³ 0,2–1,0	3 3
ГСО 10734-2015	NAS ¹	Микропоры, 0,4 < D < 2 нм	S, м ² /г V, см ³ /г D _{пр} , нм A(Ar), моль/кг	(5–12)·10 ² 0,1–0,5 0,4–0,9 1·10 ⁻³ –20	±3 ±3 ±3 ±30* ±4**
ГСО 10735-2015	C	Мезопоры, 2 < D < 50 нм	S, м ² /г V, см ³ /г D _{ср} , нм A(N ₂), моль/кг	30–60 0,1–0,5 10–20 5·10 ⁻² –10	4 10 10 10
ГСО 10449-2014	Al ₂ O ₃	То же	S, м ² /г V, см ³ /г D _{ср} , нм A(N ₂), моль/кг	100–300 0,2–1,0 5–20 1,5–25,0	2 3 3 3
ГСО 11131-2018	SiO ₂	То же	S, м ² /г V, см ³ /г D _{ср} , нм A(N ₂), моль/кг	200–400 0,5–1,5 10–20 2–33	2 3 3 1–8
ГСО 11154-2018	SiO ₂	То же	S, м ² /г V, см ³ /г D _{ср} , нм A(N ₂), моль/кг	400–1000 0,2–0,8 1–10 2–33	2 3 3 4
ГСО 11155-2018	SiO ₂	То же	S, м ² /г V, см ³ /г D _{ср} , нм A(N ₂), моль/кг	400–800 0,5–1,5 1–10 2–33	2 3 3 4

¹ NAS – матрица $\text{Na}_{86} \left[\begin{matrix} (\text{AlO}_2)_{86} \\ (\text{SiO}_2)_{106} \end{matrix} \right] \times x\text{H}_2\text{O}$

*, ** – при отношении давления газа к давлению его насыщенных паров в диапазонах 1,0·10⁻⁶–1,7·10⁻⁴ и 1,7·10⁻⁴–0,1 соответственно.

платины, палладия, меди, висмута, сурьмы, свинца, железа, цинка, магния, родия, олова, никеля, хрома, марганца, кремния. Аттестованные значения и их неопределённости установлены в ходе межлабораторного эксперимента с применением нескольких независимых методов измерений, в котором принимали участие десять аккредитованных лабораторий из разных стран, в том числе УНИИМ. В УНИИМ проведены измерения массовых долей заявленных элементов на Государственном вторичном эталоне единиц массовой доли и массовой (молярной) концентрации в жидких и твёрдых веществах и материалах ГВЭТ 196-1-2012. Таким образом, результаты измерений одного из участников межлабораторного эксперимента, выполненные непосредственно на эталоне, имеют прямую метрологическую прослеживаемость к эталону. Согласованность этого результата измерений

с результатами измерений остальных участников межлабораторного эксперимента, а также сопоставимость с полученным аттестованным значением, позволяет утверждать, что установлена прослеживаемость к эталону. Аттестованные значения СО в межлабораторном эксперименте прослеживались к ГВЭТ 196-1-2012.

Утверждённый тип СО состава золота аффинированного (комплект СО 3лН) ГСО 10903-2017 занесён в реестр СО КООМЕТ под номером 0115-2018-RU.

Заключение. Демонстрация метрологической прослеживаемости значений аттестованных характеристик СО – объективно сложная, зачастую неоднозначная задача. Её решение требует высокой квалификации специалистов в области химии и метрологии – знания методов количественного химического анализа, владения информацией об измерительных возможностях эталонов, методах и методиках измерений, включая первичные референтные и референтные методики измерений, номенклатуре разработанных СО и их метрологической прослеживаемости. Для создания СО с установленной метрологической прослеживаемостью необходимо объединять возможности НМИ и производителей коммерческих СО.

В рамках ТК 1.12 создана совместная программа разработки СО, которые утверждаются и рекомендуются для признания в качестве СО КООМЕТ и для которых необходимо обеспечить метрологическую прослеживаемость на основе принципов, рекомендуемых МБМВ, с учётом рекомендаций ИСО/РЕМКО и ILAC.

Благодарности. Коллектив авторов поздравляет региональную организацию КООМЕТ с 30-летием деятельности. Выражает искреннюю благодарность за совместное осуществление деятельности в рамках КООМЕТ Президенту и Вице-президенту КООМЕТ, участ-

никам КООМЕТ, членам ТК 1.12 «Стандартные образцы». Авторы глубоко признательны всем участникам КООМЕТ за неоценимый вклад в развитие тематики СО, формирование концепции разработки и применения СО в рамках КООМЕТ.

Авторы выражают благодарность руководителю проектов ОАО «Красцветмет» К. А. Шатных за предоставление информации, используемой при работе над статьей, и редактирование раздела статьи.

Список литературы

1. Медведевских С. В., Собина Е. П., Кремлева О. Н., Медведевских М. Ю., Собина А. В., Тараева Н. С. Метрологическая прослеживаемость стандартных образцов КООМЕТ. Часть 1. Международная практика по установлению прослеживаемости

сертифицированных значений стандартных образцов // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 25–29.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-25-29>

2. Скутина А. В., Терентьев Г. И. Государственный первичный эталон единиц массовой (молярной) доли и массовой (молярной) концентрации компонента в жидких и твёрдых веществах и материалах на основе кулонометрического титрования // Измерительная техника. 2011. № 9. С. 4–8.

3. Зыскин В. М., Шимолин А. Ю., Собина А. В., Терентьев Г. И. Создание эталонной установки на основе метода кулонометрии с контролируемым потенциалом в рамках совершенствования государственного первичного эталона ГЭТ 176 и ее измерительные возможности. Эталоны. Стандартные образцы. 2016. № 2. С. 44–54.

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2016-0-2-44-54>

4. Quinn T. J., *Metrologia*, 1997, vol. 34, pp. 61–65.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/34/1/9>

5. Ikins W., De Vries J., Wolf W., Oles P., Carpenter D., Pralle N., Ngsh-Ngwainbi J., *The Referee AOAC International*, 1993, vol. 17, no. 7, pp. 1–7.

6. Wolf W. R., Andrews K. W., *Fresenius J Anal Chem*, 1995, vol. 352, no. 1-2, pp. 73–76. <https://doi.org/10.1007/BF00322300>

7. Карнаухов А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1999.

8. Webb P. A., Orr C., *Analytical Methods in Fine Particle Technology*, Micromeritics Instrument Corporation, 1997, 301 p.

9. Фенелонов В. Б. Введение в основы адсорбции и текстурологии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.

10. Грек С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. Изд-е 2-е. М.: Мир, 1984. 306 с.

References

1. Medvedevskikh S. V., Sobina E. P., Kremlva O. N., Medvedevskikh M. Yu., Sobina A. V., Taraeva N. S., *Izmeritel'naya tekhnika*, 2021, no. 8, pp. 25–29. (In Russ.)

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-25-29>

2. Skutina A. V., Terentiev G. I., *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 9, pp. 964–970.

<https://doi.org/10.1007/s11018-011-9835-4>

3. Zyskin V. M., Shimolin A. I., Sobina A. V., Terentiev G. I., *Measurement Standards. Reference Materials*, 2016, no. 2, pp. 44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2016-0-2-44-54>

4. Quinn T. J., *Metrologia*, 1997, vol. 34, pp. 61–65.

<https://doi.org/10.1088/0026-1394/34/1/9>

5. Ikins W., De Vries J., Wolf W., Oles P., Carpenter D., Pralle N., Ngsh-Ngwainbi J., *The Referee AOAC International*, 1993, vol. 17, no. 7, pp. 1–7.

6. Wolf W. R., Andrews K. W., *Fresenius J Anal Chem*, 1995, vol. 352, no. 1–2, pp. 73–76.

<https://doi.org/10.1007/BF00322300>

7. Karnaukhov A. P. *Adsorbtsiya. Tekstura dispersnykh i poristykh materialov [The texture of dispersed and porous materials]*, Novosibirsk, Nauka Publ., Sibirskoe otделение, 1999. (In Russ.)

8. Webb P. A., Orr C., *Analytical Methods in Fine Particle Technology*, Micromeritics Instrument Corporation, 1997, 301 p.

9. Fenelonov V. B., *Vvedenie v osnovy adsorbtsii i teksturologii [Introduction to the basics of adsorption and texturology]*, Novosibirsk, SO RAN Publ., 2004. (In Russ.)

10. Grek S., Sing K., *Adsorption, specific surface area, porosity*, 2nd ed., Academic Press, 1982, 304 p.

Статья поступила в редакцию 24.05.2021; принята к публикации 01.06.2021.

Научная статья

УДК 621.317.32

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-38-40>

Национальные эталоны импульсного электрического напряжения Российской Федерации и Республики Беларусь: дополнительные сличения

Олег Викторович Каминский¹, Андрей Владимирович Клеопин², Владислав Валерьевич Макаров³, Леонид Николаевич Селин⁴✉

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0470-0904>

²kleopin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5033-9665>

³makarov_vv@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2221-9965>

⁴selin_ln@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8360-8294>

Аннотация. Рассмотрены результаты дополнительных сличений первичных национальных эталонов импульсного электрического напряжения, в результате чего подтверждены правильность оценок неопределённости измерений и измерительные и калибровочные возможности участвующих в сличениях лабораторий. Сличения проведены в рамках КООМЕТ (проект № 710/RU-a/16) по инициативе национальных метрологических институтов: Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (Россия) и Белорусского государственного института метрологии (Республика Беларусь). В сличениях участвовали Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения (ГЭТ 182-2010, ВНИИФТРИ) и Национальный эталон единицы импульсного электрического напряжения (БелГИМ, Беларусь). В качестве возимого эталона-переносчика использовали генератор перепада TMG030010SN11-M1 из состава ГЭТ 182-2010. На национальных эталонах измеряли мгновенные значения импульсного напряжения, воспроизводимые эталоном-переносчиком. Пилот-лаборатория сличений – ВНИИФТРИ. Порядок выполнения измерений мгновенных значений импульсного напряжения: измерения на ГЭТ 182-2010, измерения на эталоне БелГИМ, снова измерения на ГЭТ 182-2010. Анализ результатов сличения по критерию $\chi^2(i)$ показал, что значения критерия $\chi^2(i)$ (вычисленные в соответствии с результатами измерений) не превосходят критического значения χ^2 , что является объективным доказательством правильности оценок неопределённостей измерений, заявленных участниками сличений.

Ключевые слова: эталон, импульсное электрическое напряжение, неопределённость измерений

Для цитирования: Каминский О. В., Клеопин А. В., Макаров В. В., Селин Л. Н. Национальные эталоны импульсного электрического напряжения Российской Федерации и Республики Беларусь: дополнительные сличения // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 38–40. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-38-40>

National standards of the impulse electrical voltage of Russian Federation and Republic of Belarus: additional comparisons

Oleg V. Kaminsky¹, Andrey V. Kleopin², Vladislav V. Makarov³, Leonid N. Selin⁴✉

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow region, Russia

¹kaminsky@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0470-0904>

²kleopin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5033-9665>

³makarov_vv@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2221-9965>

⁴selin_ln@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-8360-8294>

Abstract. The results of additional bilateral comparison of initial standards of the impulse electrical voltage unit were considered. As a result of comparison there were confirmed announced uncertainties and calibration and measurement capabilities of the participants of comparison. The comparison was carried out under guidance of COOMET (project 710/RU-a/16) on the initiative of national metrology institutes (NMI): VNIIFTRI (Russia) and BelGIM (Republic of Belarus). The comparison involved national standards: the State primary standard unit of the impulse electrical voltage unit (GET 182-2010, VNIIFTRI) and the original standard of the impulse electrical voltage unit BelGIM. Step pulse generator TMG030010SN11-M1 was used as a traveling standard. The values of the impulse electrical voltage, reproduced by means of traveling standard, were measured by national standards.

The purpose of comparison was to confirm confidence in the measurement results and calibration certificates, issued by the NMI in the field of impulse electrical voltage measurements. In the comparison VNIIFTRI acted as a pilot laboratory. Measurements of impulse electrical voltage by means of traveling standard were carried out in the following order: first – measurements of impulse electrical voltage on GET 182-2010, then – on the original standard of BelGIM and finally – again on GET 182-2010. Processing of the results of comparison according to $\chi^2(i)$ criterion showed that $\chi^2(i)$ criterion values (calculated on the basis of the measurement results) doesn't exceed a critical value χ^2 , that is the objective confirmation of announced uncertainties, declared by the participants of comparison.

Keywords: standard, impulse electrical voltage, measurement uncertainty

Введение. В 2016–2019 гг. в рамках KOOMET проведены дополнительные двусторонние сличения эталонов единицы импульсного электрического напряжения. В сличениях (проект № 710/RU-a/16) приняли участие национальные метрологические институты Российской Федерации (Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) – пилот-лаборатория) и Республики Беларусь (Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ)).

Цель сличений – проверка правильности оценок неопределённости измерений и подтверждение измерительных и калибровочных возможностей участвующих в сличениях лабораторий.

Возимый эталон и методы измерений. В сличениях участвовали Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения длительностью импульса $4 \cdot 10^{-11}$ – $1 \cdot 10^{-5}$ с ГЭТ 182-2010 (ВНИИФТРИ) и Национальный эталон единицы импульсного электрического напряжения (БелГИМ). Всего было выполнено три цикла измерений – первый и последний циклы проводили во ВНИИФТРИ, второй цикл – в БелГИМ. В качестве возимого эталона-переносчика использовали генератор перепада TMG030010SN11-M1 из состава ГЭТ 182-2010.

Участники сличений измеряли воспроизводимые эталоном-переносчиком мгновенные значения импульсного напряжения во временном интервале 20–98 пс (временной интервал отсчитывали после интервала времени 20 пс от временной точки фронта импульса, соответствующей 1/2 амплитуды импульса), а также определяли длительность фронта импульсов и расширенные неопределённости результатов измерений [1, 2]. При измерениях мгновенных значений импульсного напряжения сигнал перепада нормировали к максимальной амплитуде, при этом для уменьшения погрешности воспроизведения единицы импульсного электрического напряжения, обусловленной джиттером и ограниченной полосой пропускания осциллографа, применяли специальные методы математической обработки измерительной информации [3, 4].

Результаты дополнительных сличений. На рис. 1 приведены результаты измерений средней длительности

$\tau_{\text{ср}}$ фронта импульсов эталона-переносчика на ГЭТ 182-2010 и эталоне БелГИМ ($\tau_{\text{ср ГЭТ}} = 31,24$ пс, $\tau_{\text{ср БелГИМ}} = 30,90$ пс). При этом расширенные неопределённости измерений длительности фронта импульсов составили $U_{\tau \text{ ГЭТ}} = 1,14$ пс, $U_{\tau \text{ БелГИМ}} = 1,12$ пс (для уровня доверия $P = 95\%$ при коэффициенте охвата $k = 2$).

В соответствии с Рекомендацией COOMET R/GM/19:2016 рассчитано опорное значение $\tau_{\text{ref}} = 31,07$ пс с расширенной неопределённостью $U_{\tau \text{ ref}} = 0,8$ пс ($P = 95\%$, $k = 2$); вычислено значение критерия $\chi^2 = 0,18$, которое не превосходит

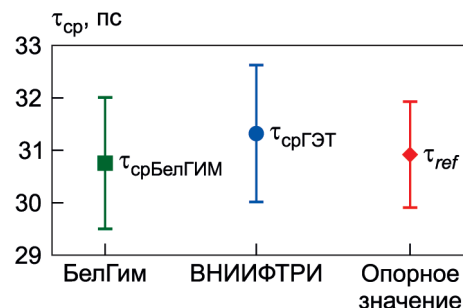


Рис. 1. Результаты измерений средней длительности $\tau_{\text{ср}}$ фронта импульсов и расширенные неопределённости измерений; τ_{ref} – опорное значение

Fig 1. The results of measurement front duration $\tau_{\text{ср}}$ and extended uncertainties; τ_{ref} – reference value

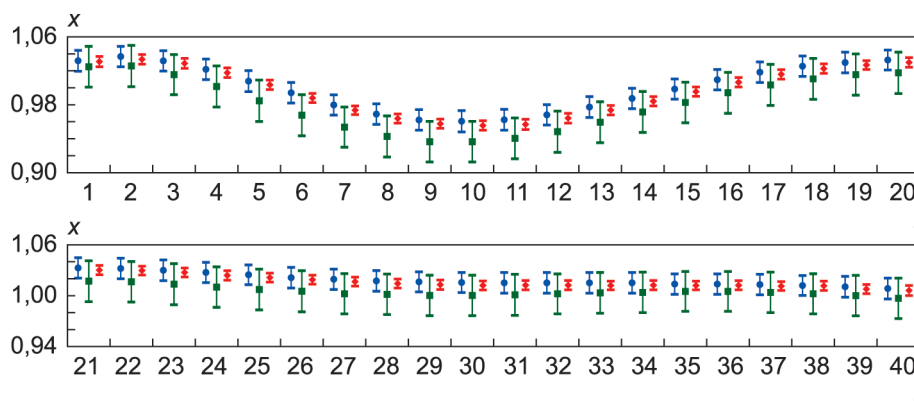


Рис. 2. Результаты измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения $x(i)$ для временных интервалов 20–58 пс (отсчёты $i = 1, \dots, 20$), 60–98 пс (отсчёты $i = 21, \dots, 40$) и расширенные неопределённости измерений:
■ – $x_{\text{БелГИМ}}(i)$ БелГИМ; ● – $x_{\text{ГЭТ}}(i)$ ВНИИФТРИ; ♦ – $x_{\text{ref}}(i)$

Fig 2. The results of measurement instantaneous values of the pulsed voltage at the times from 20 to 58 ps (from 1 to 20 data points), from 60 to 98 ps (from 21 to 40 data points) and extended uncertainties:
■ – BelGIM, ● – VNIIFTRI, ♦ – reference values

Результаты измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения на ГЭТ 182-2010 и эталоне БелГИМ

i	$\Delta t(i)$, пс	$x_{\text{ГЭТ}}(i)$	$x_{\text{БелГИМ}}(i)$	$x_{\text{ref}}(i)$	$\chi^2(i)$
1	20	1,031	1,024	1,030	0,27
2	22	1,036	1,025	1,033	0,70
3	24	1,031	1,015	1,028	1,46
4	26	1,021	1,001	1,017	2,29
5	28	1,007	0,984	1,003	3,04
6	30	0,993	0,967	0,987	3,60
7	32	0,979	0,953	0,973	3,71
8	34	0,968	0,942	0,963	3,83
9	36	0,962	0,936	0,957	3,55
10	38	0,960	0,936	0,955	3,11
11	40	0,962	0,940	0,957	2,62
12	42	0,968	0,948	0,964	2,17
13	44	0,977	0,959	0,973	1,80
14	46	0,987	0,971	0,984	1,53
15	48	0,998	0,983	0,995	1,34
16	50	1,009	0,994	1,006	1,23
17	52	1,018	1,003	1,015	1,18
18	54	1,025	1,010	1,022	1,18
19	56	1,029	1,015	1,026	1,22
20	58	1,032	1,017	1,029	1,30
21	60	1,033	1,017	1,030	1,38
22	62	1,032	1,016	1,029	1,47
23	64	1,030	1,013	1,027	1,53
24	66	1,027	1,010	1,024	1,58
25	68	1,024	1,007	1,021	1,59
26	70	1,021	1,005	1,018	1,58
27	72	1,019	1,002	1,016	1,54
28	74	1,017	1,001	1,014	1,47
29	76	1,016	1,000	1,013	1,37
30	78	1,015	1,000	1,012	1,23
31	80	1,015	1,001	1,012	1,07
32	82	1,015	1,002	1,012	0,90
33	84	1,015	1,003	1,012	0,73
34	86	1,015	1,004	1,012	0,60
35	88	1,014	1,005	1,012	0,52
36	90	1,014	1,005	1,012	0,48
37	92	1,013	1,004	1,011	0,49
38	94	1,012	1,002	1,011	0,54
39	96	1,010	1,000	1,008	0,62
40	98	1,008	0,997	1,006	0,71

критическое значение $\chi_{\text{кр}}^2 = 3,84$ ($P = 95\%$ при двусторонних сличениях).

В таблице и на рис. 2 приведены результаты измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения на ГЭТ 182-2010 $x_{\text{ГЭТ}}(i)$ и БелГИМ $x_{\text{БелГИМ}}(i)$ во временном интервале $\Delta t(i) = 20 \dots 98$ пс ($i = 1, \dots, 40$ – номер отсчёта). В соответствии с Рекомендацией COOMET R/GM/19:2016 рассчитаны опорные значения $x_{\text{ref}}(i)$ с расширенными

неопределённостями; вычислены значения критерия $\chi^2(i)$, которые не превосходят $\chi_{\text{кр}}^2 = 3,84$ ($P = 95\%$ при двусторонних сличениях).

Расширенные неопределённости измерений мгновенных значений импульсного электрического напряжения составили не более 1,4; 2,4; 1,08 % соответственно для ГЭТ 182-2010, эталона БелГИМ и опорных значений ($P = 95\%$, $k = 2$).

Заключение. Результаты сличений подтверждают, что национальные эталоны воспроизводят единицу импульсного электрического напряжения одинаково в пределах значений расширенной неопределённости. При этом отличия от опорных значений не превышают расширенной неопределённости для всех измеренных мгновенных значений импульсного электрического напряжения.

Список литературы

1. Маневич В. З., Селин Л. Н. Государственный первичный специальный эталон единицы импульсного электрического напряжения с длительностью импульса $4 \cdot 10^{-11} - 1 \cdot 10^{-5}$ с // Измерительная техника. 2011. № 12. С. 6–12.
2. Гэнс У. Л. Градуировка и анализ погрешностей установки NBS для измерения пикосекундных импульсных сигналов // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1986. Т. 74. С. 97–102.
3. Новиков Н. Ю., Клеопин А. В. Исследование методов измерения параметров джиттера с использованием математического моделирования имитатора сигналов и цифрового осциллографа // Измерительная техника. 2008. № 8. С. 55–57.
4. Andrews J. R., *Removing Jitter From Picosecond Pulse Measurements*. Boulder, Picosecond Pulse Labs, 2009, Appl. Note 23.

References

1. Manevich V. Z., Selin L. N., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 54, no. 12, pp. 1319–1326. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9890-5>
2. Gans W. L., *Proc. IEEE*, 1986, vol. 74, no. 1, pp. 86–90. <https://doi.org/10.1109/PROC.1986.13408>
3. Novikov N. Yu., Kleopin A. V., *Measurement Techniques*, 2008, vol. 51, no. 8, pp. 893–895. <https://doi.org/10.1007/s11018-008-9126-x>
4. Andrews J. R., *Removing Jitter From Picosecond Pulse Measurements*. Boulder, Picosecond Pulse Labs, 2009, Appl. Note 23.

Статья поступила в редакцию 22.04.2021; принята к публикации 05.07.2021.

Научная статья

УДК 519.622.2

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-41-50>

Косвенная оценка переменных состояния реакционно-регенерационных систем на основе компьютерной симуляции

Гасан Али оглы Нагиев¹✉, Нюбар Алимурад гызы Гулиева²

¹ Институт математики и механики Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджанская Республика, hasannagiev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-4158-6434>

² Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика, n.quliyeva@mail.ru

Аннотация. Описана реакционно-регенерационная система, которая является аппаратной частью промышленных производств и характеризуется исключительной особенностью – выраженной нелинейностью в виде множественности стационарных решений модельных дифференциальных уравнений. Такая особенность вынуждает прибегнуть к инженерным решениям, альтернативным прямым измерениям. Рассмотрена проблема косвенной оценки компонент вектора состояния реакционно-регенерационной системы. Показана некорректность косвенной оценки состояния подобного рода объектов на основе теории фильтров Калмана. Некорректность обусловлена неоднозначностью отображения пространства состояний в пространство касательных к траекториям векторов. Предложен подход, основанный на синхронной симуляции в динамике и заключающийся в сравнении двух эволюций «объект – модель» с минимизацией рассогласования. Приведена методика, базирующаяся на включении в функцию рассогласования вторых производных переменных состояния. Рассмотрена методология чувствительности систем косвенного оценивания, основанных на максимизации подобия сравниваемых эволюций «объект – модель» в режиме строгой синхронизации по внешним возмущениям и рычагам управления. Показано, что точность косвенного оценивания физически неизмеряемых координат в большей степени определяется математическими аспектами минимизации функции рассогласования, которая из-за множественности решений модельных уравнений имеет сложную структуру поверхности отклика.

Ключевые слова: косвенное измерение, множественность стационарных состояний, трёхмерный фазовый портрет, реакционно-регенерационная система

Для цитирования: Нагиев Г. А., Гулиева Н. А. Косвенная оценка переменных состояния реакционно-регенерационных систем на основе компьютерной симуляции // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 41–50. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-41-50>

Indirect estimation of state variables of industrial reaction-regeneration systems based on computer simulation

Hasan A. Nagiyev¹✉, Nyubar A. Gulyeva²

¹ Institute of Mathematics and Mechanics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Republic of Azerbaijan, hasannagiev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-4158-6434>

² Sumgait State University, Sumgait, Republic of Azerbaijan, n.quliyeva@mail.ru

Abstract. A reaction-regeneration system is described, which is a hardware part of industrial production and is characterized by an exceptional feature – pronounced nonlinearity in the form of a plurality of stationary solutions of model differential equations. This feature forces one to resort to engineering solutions that are alternative to direct measurements. The problem of indirect estimation of the components of the state vector of the reaction-regeneration system is considered. The incorrectness of the indirect assessment of the state of such objects on the basis of the theory of Kalman filters is shown. The incorrectness is due to the ambiguity of the mapping of the state space into the space of vectors tangent to the trajectories. An approach based on synchronous simulation in dynamics is proposed, which consists in comparing two evolutions “object – model” with minimization of the mismatch. A technique based on the inclusion of the second derivatives of the state variables into the mismatch function is presented. The methodology of the sensitivity of indirect estimation systems based on maximizing the similarity of the compared evolutions “object – model” in the regime of strict synchronization with respect to external disturbances and control levers is considered. It is shown that the accuracy of the indirect estimation of physically unmeasurable coordinates is largely determined by the mathematical aspects of minimizing the mismatch function, which, due to the multiplicity of solutions to model equations, has a complex structure of the response surface.

Keywords: indirect measurement, multiplicity of stationary states, three-dimensional phase portrait, reaction-regeneration system

Введение. Проблема модельного оценивания состояния промышленных реакционно-регенерационных систем, характеризующихся множественностью стационарных состояний. Множественность решений

уравнений математических моделей является одним из существенных отличий нелинейных систем и требует особого внимания в задачах управления. В инженерной практике термин «множественность» чаще употребляется в связи с положениями равновесия систем, т. е. этим термином обозначается класс нелинейных объектов, которые имеют в фазовом пространстве не единственное стационарное состояние. Анализ множественности положений равновесия представляет интерес в основном из-за того, что во многих случаях положения равновесия оказываются центрами притяжения движений динамической системы – так называемыми аттракторами, к которым стягивается ряд семейств траекторий. Кроме того, при проектировании непрерывных производственных процессов, как правило, предполагают их проведение в стационарных условиях при достижении координат состояния равновесия, соответствующих наиболее благоприятным технологическим условиям.

В то же время для подобных систем при одних и тех же внешних условиях существует множество не только равновесных, но и других состояний, не соответствующих нулевой скорости движения систем в заданный момент времени. Такие состояния системы представляют интерес, в частности, в связи с задачей косвенного измерения некоторых координат динамической реакционно-регенерационной системы (PPC) в связи с отсутствием приемлемого физического метода измерения. PPC используются в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и являются специфическими объектами управления. Их реализация основана на совместном функционировании двух взаимосвязанных технологических блоков. К характерным чертам данных объектов управления относятся нелинейность этих систем и необходимость применения косвенных измерений.

Каталитический крекинг нефтяных фракций и дегидрирование углеводородов – типичные примеры применения PPC [1, 2]. Регенерации подвергается микросферический твёрдый катализатор, высокопористый алюмосиликат, который в ходе реакции претерпевает быстрое коксование. Высокая скорость образования кокса обуславливает необходимость циркуляционной очистки катализатора путём выжигания. Циркуляционная система двух технологических блоков «реактор – регенератор», предназначенная для непрерывной регенерации катализатора параллельно с крекингом, по сути, из-за динамической связи по коксовому (следовательно, и тепловому) балансу этих блоков фактически представляет собой весьма сложный объект управления [3]. Выраженно нелинейный характер взаимосвязи переменных состояния и параметров режима вызывает множественность положений равновесия данной динамической системы [4, 5], что не позволяет косвенно оценивать указанные переменные. К таким переменным состояния относятся степени закоксованности катализатора – приобретённая после целевой реакции и остаточная, связанная с неполным удалением кокса при регенерации.

Попытки создания аппаратных средств оперативного измерения степеней закоксованности катализатора на выходах реактора и регенератора до сих пор безуспешны [6]. Проблема инженерного обеспечения этих измерений, характерная для большинства химических процессов, усугубляется

рядом специфических препятствий, таких как высокая температура, абразивное воздействие потока катализатора и коксующая среда. Образование коксовых отложений является основным источником тепла в общем энергетическом балансе целевого химического процесса. Кроме того, на качество управления технологическим режимом по-разному влияют поверхностный и глубинный кокс: помимо осаждения на поверхности, кокс проникает вглубь, закупоривая каналы в пористой структуре катализатора и резко уменьшая каталитическое действие [7, 8]. Получение достоверной информации о степени закоксованности как поверхностного, так и глубинного катализатора и в настоящее время остаётся технической задачей первостепенной важности [9–12].

В последние годы проблему оперативного контроля состояния использующихся мелкодисперсных катализаторов в циркуляционном потоке в основном удаётся решать косвенно. Оперативные данные о процессе регенерации в большей степени базируются на результатах измерений состава выходящих газов, например, с применением инфракрасного измерителя концентрации углекислого газа CO_2 . Однако данные таких измерений отражают только общую картину реакций горения, при этом остаётся неизвестным происхождение CO_2 : кроме коксовых отложений в горении участвует значительное количество адсорбированных углеводородов, попадающих в регенератор. Заметим, что существующие автоматические или полуавтоматические измерители содержания кокса (углерода) в твёрдых материалах, в том числе катализаторах, в основном являются лабораторными установками (в частности, анализатор серы и углерода LECO CS-230 (Leco Corporation, США)) и не приспособлены к использованию в потоке.

Распространённая методология косвенного оценивания состояния динамических объектов основана на теории фильтров Калмана [13]. Принципиальным для этой теории является то, что размерность вектора состояний наблюдаемой системы (как и в рассматриваемой задаче) может существенно превышать размерность вектора контролируемых переменных. С этой точки зрения алгоритмическая конструкция фильтра Калмана в своей основе направлена на выработку алгоритма дооценивания состояния при использовании сигналов внешних возмущений. Оптимальный наблюдатель, построенный на рекурсивных алгоритмах фильтров Калмана, способен распознавать и учитывать статистические показатели возмущающих факторов и ошибок измерительных устройств, и его введение в технику измерения в ряде случаев превращает данную методологию в удачное средство контроля. Однако ограничение в виде требования линейности контролируемой системы оказывается непреодолимым препятствием при использовании фильтров Калмана для решения задач, не допускающих линеаризацию.

Для решения таких задач перспективным является применение метода математического моделирования динамики системы PPC – достаточно детерминированной с точки зрения тепловых состояний. Именно строгая детерминированность рассматриваемой тепловой системы позволяет контролировать все факторы, влияющие на формирование теплового (коксового) баланса.

Следует отметить, что, хотя динамика PPC и подчинена довольно строгим детерминированным связям между переменными, однако их косвенное оценивание неосуществимо без применения специальных подходов, учитывающих специфику данной задачи. Основная специфика заключается в множественности положений равновесия. Множественность различных структур организаций семейств фазовых траекторий в объектах подобного рода приводит к неоднозначности функций состояния динамической системы.

Цель работы – разработать метод косвенного оценивания вектора состояния динамических систем, характеризующихся множественностью положений равновесия, и представить результаты применения метода на примере PPC.

Математическая модель тепловой динамики реакционно-регенерационной системы. На рис. 1 показана схема PPC, осуществляющей химический процесс в кипящих слоях микросферического катализатора. Тепловое состояние рассматриваемой динамической системы определяют температуры реактора и регенератора, а также степени закоксованности катализатора на их выходах. Режимными параметрами являются показатели расхода сырья и воздуха для реакции выжигания кокса, а также скорость циркуляции катализатора.

Математическую структуру модели динамической PPC можно представить в виде взаимосвязи моделей двух реакторов с псевдооживленными слоями масс катализатора, объединённых материальными и тепловыми потоками.

Состояние псевдооживления и малые размеры частиц катализаторной пыли позволяют применить простые модели идеального смешения по обоим аппаратам. На этой основе составлены модельные уравнения по четырём переменным состояния в соответствии с описанием процесса, т. е. по двум температурам в реакционных зонах аппаратов (реактора и регенератора) и содержанию кокса на частицах отработанного и регенерированного потоков катализатора. Концентрации коксовых отложений выражаются в массовых отношениях. Скорости процессов масштабируются относительно характерного времени PPC порядка 30 мин. Дифференциальные уравнения коксового и теплового баланса, записанные по температурам и содержаниям кокса в аппаратах, а также по их производным во времени, имеют вид [14]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= \frac{n}{\tau_1}(y_2 - y_1) - K_1(y_3, y_1); \\ \frac{dy_2}{dt} &= \frac{n}{\tau_2}(y_1 - y_2) + K_2(y_1, y_2, y_4)\varphi_{в.с}; \\ \frac{dy_3}{dt} &= \frac{n}{\tau_1}(y_4 - y_3) + \frac{K_1(y_3, y_1)q_1}{c_k} + \frac{q_3\varphi_T}{G_1c_k} + \frac{nq_4d_k}{c_k\tau_1} - \\ &\quad - \frac{\varphi_{в.с}y_3}{G_1c_k} + v_1; \\ \frac{dy_4}{dt} &= \frac{n}{\tau_2}(y_3 - y_4) - \frac{q_2}{c_k}K_2(y_1, y_2, y_4)\varphi_{в.с} + \\ &\quad + \frac{c_{с.р}}{G_2c_k}\varphi_{с.р}(y_{с.р} - y_4) + v_2; \end{aligned} \right\} (1)$$

$$K_1(y_3, y_1) = k_{01}e^{-b_1/y_3}y_1^2;$$

$$K_2(y_1, y_2, y_4) = k_{02}e^{-b_2/y_4} \frac{1 + \alpha y_1}{1 + \exp[-\beta(y_2 - y_2^H)]};$$

$$\tau_1 = \varphi_k/Q_1; \quad \tau_2 = \varphi_k/Q_2; \quad \varphi_{в.с} = \varphi_{с.р}/Q_2.$$

В формулах использованы следующие обозначения переменных и параметров.

Фазовые переменные: y_1, y_2 – остаточные закоксованности катализатора после регенератора и на выходе реактора; y_3, y_4 – температуры в реакторе и регенераторе.

Режимные параметры: $n = \varphi_k/\varphi_k^H$ – приведённая к номиналу скорость циркуляции катализатора; $\varphi_k, \varphi_{с.р}, \varphi_{в.с}, \varphi_T$ – массовые скорости соответственно циркуляции катализатора, ввода сырья в реактор, воздуха в регенератор, ввода топлива для подогрева регенератора; $y_{с.р}$ – температура вводимого в реактор сырья.

Неизменные технологические и кинетические параметры, а также константы материального и теплового балансов модели PPC: Q_1, Q_2, τ_1, τ_2 – массы катализатора и постоянные гидродинамического времени по потокам циркуляции катализатора соответственно в регенераторе и реакторе, $\varphi_{в.с}, y_2^H$ – приведённая весовая скорость ввода сырья и номинальное значение закоксованности катализатора на выходе реактора; $K_1(y_3, y_1), K_2(y_1, y_2, y_4)$ – кинетические функции скоростей реакций соответственно горения и образования кокса; $\alpha, \beta, b_1, b_2, k_{01}, k_{02}$ – кинетические параметры, реакций образования и горения кокса; $c_k, c_{с.р}, d_k$ – теплоёмкости катализатора, углеводородного сырья и адсорбционная ёмкость катализатора; $q_1, \dots, q_4$ – тепловые эффекты реакций горения соответственно кокса, целевого химического превращения, теплотворности газового топлива

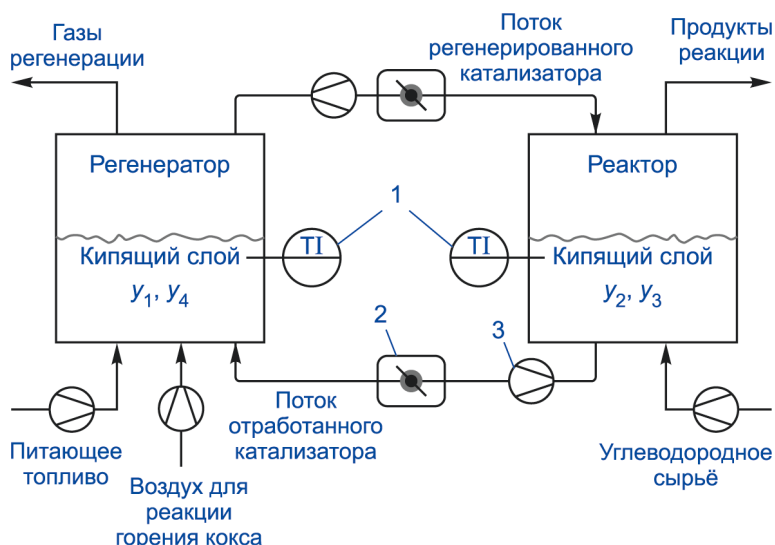


Рис. 1. Функциональная схема реакционно-регенерационной системы: 1 – уровнемеры кипящего слоя; 2 – регулирующий клапан; 3 – расходомер

Fig. 1. Functional diagram of the reaction-regeneration system: 1 – fluidized bed level gauges; 2 – control valve; 3 – flow meter

и углеводородов, адсорбированных в поры катализатора; v_1, v_2 – постоянные величины, учитывающие теплопередачу в окружающую среду, а также приток теплоты извне.

Таким образом, на материальный и тепловой баланс в системе влияют множество автоматически контролируемых параметров. Задачей построенной модели является расчётное (косвенное) установление истинных значений указанных переменных состояния. При этом необходимо учитывать, что решение уравнения динамического баланса потоков теплоты в произвольное время может быть не единственным.

Приведём номинальные значения параметров модели (1): $k_{01}=5083 \text{ ч}^{-1}$; $k_{02}=170 \text{ ч}^{-1}$; $c_K=1,68 \text{ кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$; $c_{c.p}=2,22 \text{ кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$; $c_B=1,005 \text{ кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$; $q_1=29400 \text{ кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$; $q_2=350 \text{ кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$; $q_3=q_4=45000 \text{ кДж} \cdot (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$; $\varphi_K=560 \text{ Т} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\varphi_{c.p}=80 \text{ Т} \cdot \text{ч}^{-1}$; $\varphi_B=860 \text{ Т} \cdot \text{ч}^{-1}$; $n=7$.

Учёт множественности решений модельных уравнений в задаче косвенного оценивания переменных состояния. Представим систему (1) в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\mathbf{y}}_{12} = \mathbf{f}_{12}(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}, \mathbf{r}); \\ \dot{\mathbf{y}}_{34} = \mathbf{f}_{34}(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}, \mathbf{r}); \\ \left(\begin{array}{c} \mathbf{y}_{12} \\ \mathbf{y}_{34} \end{array} \right) \equiv (y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4)^T; \\ \left(\begin{array}{c} \mathbf{f}_{12} \\ \mathbf{f}_{34} \end{array} \right) \equiv (f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4)^T, \end{array} \right. \quad (2)$$

где вектор состояния $\mathbf{y} = (y_1, y_2, y_3, y_4)$ разделён на вектор косвенно определяющихся переменных закоксованности катализатора на выходах аппаратов (поверхностный и глубинный кокс) $\mathbf{y}_{12} = (y_1, y_2)$ и вектор измеряющихся переменных состояния (температуры в аппаратах) $\mathbf{y}_{34} = (y_3, y_4)$; $\mathbf{r}$ – вектор режимных переменных.

Предполагается, что симуляция будет проводиться в режиме жёсткой привязки датчиков сигналов к входным устройствам имитирующей системы (модели), эволюционирующей в реальном времени синхронно с управляемым объектом. Состояние оценивается в заданный момент времени, поэтому в системе (2) пропущены скобки, включающие аргумент t .

Функционально система оценивания двух неконтролируемых переменных состояния представляет собой среду имитации, эволюционирующей параллельно с технологическим комплексом и учитывающей все реалии внешних воздействий. При этом в непрерывном потоке осуществляется ввод сигналов измерения режимных параметров $\mathbf{y}_{34}(t_n)$; $u(t_n)$; $r(t_n)$; $t_n = t_0 + nh$; $n=1, 2, \dots$, с выдачей данных о текущих оценках переменных состояния $\mathbf{y}_{12}(t_n)$.

Введём функцию невязки относительно истинного и расчётного значений переменных состояния $\mathbf{y}_{12}(t)$. Зафиксируем в модели измеренные значения переменных состояния, вводя соответствующий вектор-функцию $\mathbf{y}_{34}^*(t)$. Вектор скорости изменения переменных состояния $\dot{\mathbf{y}}_{34}^*(t)$ можно сформировать путём аппроксимации последовательности дискретных измерений, равноотстоящих во времени.

В общем случае для четырёх степеней свободы запишем минимизируемую функцию невязки (функцию индикации):

$$I(\dot{\mathbf{y}}_{12}, \mathbf{y}_{12}) = \sum_{i=1}^2 b_i [\dot{y}_i - f_i(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}^*, r^*)]^2 + \sum_{i=3}^4 b_i [\dot{y}_i^* - f_i(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}^*, r^*)]^2, \quad (3)$$

где $(\dot{y}_1, \dot{y}_2) = \dot{\mathbf{y}}_{12}$ – производная по времени искомого вектора $\mathbf{y}_{12}$; $\mathbf{y}_{34}^*, \dot{\mathbf{y}}_{34}^*$ – векторы измеряющихся переменных состояния; $r^* = (u^*, p^*)^T$ – измеряемые значения режимных параметров; $b_i, i=1, 4$ – весовые коэффициенты.

Вначале рассмотрим данную задачу оценивания в предположении линейности наблюдаемой системы. В этом случае можно констатировать, что достижение минимума функции (3) по переменным $\mathbf{y}_{12}, \dot{\mathbf{y}}_{12}$ является достаточно строгим основанием для принятия полученного решения в качестве искомого. Такое утверждение опирается, с одной стороны, на теорему о единственности траектории, проходящей через заданную точку $\mathbf{y}(t_0) = \mathbf{y}^*$, и на допущение о линейности модельной динамической системы – с другой стороны. Каждому касательному вектору из поля скоростей $\mathbf{v}(\mathbf{y}) \in V$ в линейной системе может соответствовать лишь одна координата состояния $\mathbf{y}$. Рассмотрим простой пример системы с двумя степенями свободы. Исключим время t и запишем систему

$$\frac{dy_2}{dy_1} = \frac{f_2(y_1, y_2)}{f_1(y_1, y_2)}.$$

Этот пример наглядно поясняет полную определённости решения линейной системы в координатном пространстве (пространстве состояний), поскольку любой точке этого пространства соответствует определённый касательный к траектории вектор. В фиксированном времени $t = \tau$ проекциями касательного вектора оказываются векторы скоростей $\mathbf{v}(\tau) = [f_1(\mathbf{y}(\tau)), \dots, f_4(\mathbf{y}(\tau))]$. Отображение пространства состояний автономных дифференциальных уравнений в пространство векторов скоростей однозначно не определено только в особых точках $\mathbf{v}(\mathbf{y}) = 0$ – точках равновесия [15]. Это даёт основание переписать формулу (3) с изъятием аргументов $\dot{\mathbf{y}}_{12}$ из списка варьируемых и оставив в качестве варьируемых только искомым вектор фазовых переменных $\mathbf{y}_{12}$. Следовательно, формулу поиска искомого приближения для линейной системы можно записать в виде

$$\mathbf{y}_{12}(\mathbf{y}_{34}^*, \dot{\mathbf{y}}_{34}^*) = \arg \min_{\mathbf{y}_{12} \in G_{12}} \left\{ \sum_{i=3}^4 b_i [\dot{y}_i^* - f_i(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}^*, r^*)]^2 \right\}, \quad (4)$$

где G_{12} – допустимая область варьируемого вектора.

Однако для рассматриваемых нелинейных систем, характеризующихся множеством стационарных состояний, утверждение об однозначности указанного выше отображения несправедливо по меньшей мере потому, что в этом случае нулевому вектору скоростей будет соответствовать некоторое множество особых точек координатного пространства. Но неоднозначность соответствия допускает любой касательный

вектор, а не только нулевой вектор скоростей, если в заданной области пространства состояний G имеет место множественность стационарных решений системы дифференциальных уравнений. Докажем это утверждение на примере стационарных решений системы $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\mathbf{x})$.

Имеем алгебраическую систему $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0$ с некоторым множеством решений $\mathbf{x}_k \in G$. В нестационарных (переходных) состояниях в произвольное время справедливо уже уравнение с ненулевой правой частью $\mathbf{F}[\mathbf{x}(t)] = \mathbf{b}(t)$. Зафиксируем время $t = \tau$ и получим алгебраическую систему $\mathbf{F}[\mathbf{x}(\tau)] - \mathbf{b}(\tau) = 0$, число решений которой определено как функцией $\mathbf{F}$ и областью допустимых состояний G , так и вектором $\mathbf{b}(\tau)$. Однако множественность стационарных состояний, имеющая место в области G , уже предвещает множественность и нестационарных состояний.

На рис. 2 показаны проекции семейств фазовых траекторий модели (1) на трёхмерное пространство переменных (y_1, y_2, y_3) . Область, в которую спроецированы семейства фазовых траекторий, соответствует нормативам номинальных режимов промышленной установки дегидрирования изобутана [14]. Сокращение размерности четырёхмерной модели PPC, т. е. системы (1) до геометрически представимой модели третьего порядка стало возможным в силу условия $y_4(t) = y_4^* = \text{const}$, соблюдаемого при построении фазового портрета системы (1). Проецирование множеств траекторий в трёхмерное фазовое пространство в данном случае условно и служит только для удобства геометрических представлений. В фазовом портрете отмечены особые точки O_1, O_2, O_3 – состояния равновесия. Области влияния аттракторов O_1, O_3 (см. рис. 2) имеют вид центров слияния траекторий. Факт сосуществования трёх неподвижных точек (двух аттракторов O_1, O_3 и репеллера O_2 на магистрали стекания потоков траекторий) [16, 17] даёт геометрическое представление о множественности не только стационарных, но и нестационарных состояний. Так, на рис. 2 отмечены два одинаковых вектора скорости движения, касающиеся разных траекторий при разных координатах состояния.

Векторы $\mathbf{v}(\mathbf{y}^*)$, $\mathbf{v}(\mathbf{y}^{**})$, касательные к траекториям в разных точках координатного пространства (с компонентами, определяемыми в (1) векторами скоростей $\mathbf{f}(y_1, \dots, y_4)$), показаны пунктирными линиями. В отличие от линейных систем, для которых любой касательный вектор связан с вектором координат однозначно [16, 17], здесь это положение не сохраняет силу. Отражение данного факта на функции невязки (4) проявит себя в том, что в ней будут присутствовать мало отличающиеся по глубине три числа локальных минимума.

На рис. 3 показана поверхность функции отклика (3) в двухмерной области $G^H = (y_1^{\max} \leq y_1 \leq y_1^{\min}) \times (y_2^{\max} \leq y_2 \leq y_2^{\min})$ при фиксированных остальных векторах состояния $\mathbf{y}_{34}, \dot{\mathbf{y}}_{34}, \ddot{\mathbf{y}}_{34}$. Два минимума являются прямым признаком неединственности решения, что вынуждает прибегнуть к использованию вторых производных в качестве дополнительных переменных, вводимых в минимизируемую функцию (4). Для этого выписывается ряд Тейлора в окрестности некоторой точки $\mathbf{y}$ пространства состояний.

Продифференцируем систему дифференциальных уравнений по времени:

$$\begin{aligned} (\mathbf{y}'_t)'_t &= [\mathbf{f}(\mathbf{y})]'_t = \mathbf{f}'_y(\mathbf{y})\mathbf{y}'_t = \\ &= \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \frac{\partial f_1}{\partial y_3} & \frac{\partial f_1}{\partial y_4} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_4}{\partial y_1} & \frac{\partial f_4}{\partial y_2} & \frac{\partial f_4}{\partial y_3} & \frac{\partial f_4}{\partial y_4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{dy_1}{dt} \\ \dots \\ \frac{dy_4}{dt} \end{pmatrix} = J(t)\mathbf{f}[\mathbf{y}(t)]. \end{aligned}$$

Введём в формулу (3) рассогласования по вторым производным и получим функцию индикации:

$$\begin{aligned} I(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}, \dot{\mathbf{y}}_{34}^*, \ddot{\mathbf{y}}_{34}^*) &= \sum_{i=3}^4 b_{1i} [\dot{y}_i^*(t) - f_i(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}^*, r^*)]^2 + \\ &+ \sum_{i=3}^4 b_{2i} \{ \ddot{y}_i^*(t) - J_i[\mathbf{y}(t)]\mathbf{f}[\mathbf{y}(t)] \}^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где $J_i[\mathbf{y}(t)]$, $i=3, 4$ – соответствующие строки матрицы Якоби в момент времени t для системы (1); $\ddot{y}_i^*(t)$, $i=3, 4$ – компоненты вторых производных от переменных состояния системы (1), вычисленных по измерительным сигналам в моменты времени $t, t+h_t, t+2h_t$.

Запишем формулу минимизации рассогласования неизмеряемой составляющей $\mathbf{y}_{12}$ вектора состояния с его измеряемой составляющей $\mathbf{y}_{34}$ и двумя производными по времени $\dot{\mathbf{y}}_{34}^*, \ddot{\mathbf{y}}_{34}^*$:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{12}(\mathbf{y}_{34}, \dot{\mathbf{y}}_{34}^*, \ddot{\mathbf{y}}_{34}^*) &= \\ &= \arg \min_{\mathbf{y}_{12} \in G_{12}} \left[\sum_{i=3}^4 b_{1i} [\dot{y}_i^*(t) - f_i(\mathbf{y}_{12}, \mathbf{y}_{34}^*, r^*)]^2 + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i=3}^4 b_{2i} \{ \ddot{y}_i^*(t) - J_i[\mathbf{y}(t)]\mathbf{f}[\mathbf{y}(t)] \}^2 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Оценивание чувствительности и точности метода с использованием поисковых процедур нелинейного программирования. Особенность оценивания метрологических параметров рассматриваемой системы обусловлена необходимостью применения вычислительных процедур минимизации функции (6). Хотя и принятая идеализация о полной детерминированности и адекватности использующейся модели значительно упрощает анализ метрологических характеристик системы, однако на порядок вычисления чувствительности и точности алгоритма решения влияют вычислительно-поисковые процедуры нелинейного программирования.

Чувствительность. Необходимо получить аналитические выражения, устанавливающие зависимость данной характеристики от математической структуры и параметров модели. Так называемая пороговая чувствительность в данном случае теряет какой-либо смысл, поскольку в модели все связи между переменными заданы аналитическими функциями.

Исходя из принятой классификации методов измерения [18] предлагаемый алгоритм оценивания следует отнести к нулевому

методу (null method of measurement), который является одним из вариантов метода сравнения с мерой. В основе предлагаемого алгоритма лежит сравнение векторов текущего состояния с векторами-решениями балансовых уравнений и доведение результирующего эффекта сравнения до близости к нулю. С этой позиции функцию индикации $I(y_{12}, y_{34}, \dot{y}_{34}^*, \ddot{y}_{34}^*)$ (меру расстройки функционала сходимости) в геометрическом

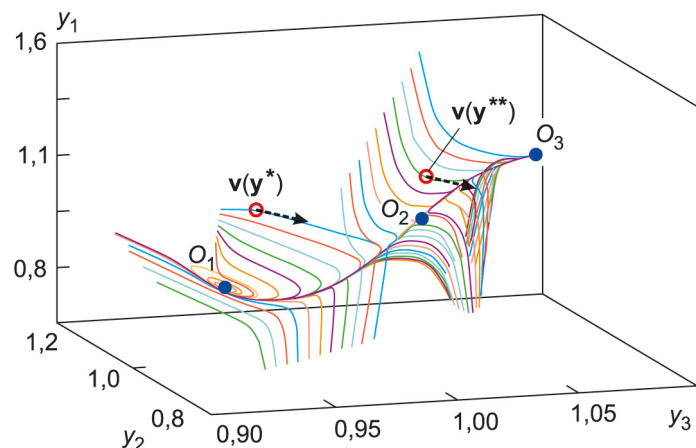


Рис. 2. Проекция семейств фазовых траекторий на трёхмерное пространство состояний модели «реактор – регенератор» при допущении идеальной стабильности одной координаты системы $y_4(t) = \text{const}$

Fig. 2. Projection of families of phase trajectories onto the three-dimensional space of states of the “reactor – regenerator” model under the assumption of ideal stability of one coordinate of the system $y_4(t) = \text{const}$

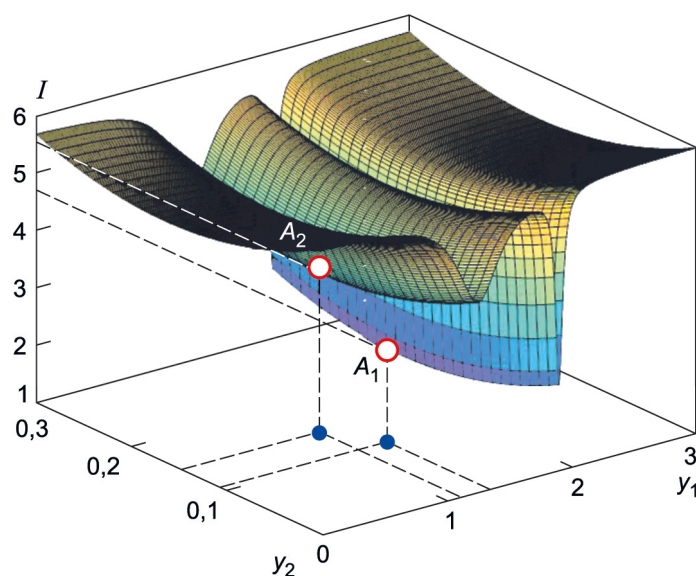


Рис. 3. Графическое представление расположения двух точек минимума A_1, A_2 на поверхности функции (3) вследствие неединственности решений системы (1)

Fig. 3. Graphical representation of the location of two minimum points A_1, A_2 on the surface of function (3) due to the non-uniqueness of solutions to system (1)

представлении можно выразить как параметр глубины минимумов выражения (5) (см. рис. 3). Глубину минимума $\tilde{H}_{\min}$, как и другие свойства этой функции, практически невозможно оценить в широкой области варьирования переменных y_1, y_2 . Косвенное оценивание глубины минимума можно выполнить с использованием понятия «характеристической близости» к точному минимуму.

Запишем формулу для чувствительности, опираясь на функцию минимизации меры рассогласования «модель – среда измерения» (5):

$$\left. \begin{aligned} s_1 &= \frac{\partial I(\cdot)}{\partial y_1}; \\ s_2 &= \frac{\partial I(\cdot)}{\partial y_2}; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $I(\cdot)$ определена функциями (5) или (6).

Так как оценивание выполняется на основе фактически всех измерительных сигналов, задействованных в уравнении (5), то дифференциалы (7) должны вычисляться с учётом текущих значений всех фазовых переменных $y(t^*)$, $\dot{y}(t^*)$, $\ddot{y}(t^*)$ и переменных режима $r(t^*)$, описанных ранее в настоящей статье. Векторы скорости и ускорения вычисляются методом аппроксимации данных конечного числа последовательных измерений t_n , $n = 1, 2, 3$. Введём обозначения:

$$s_1 = \frac{\partial}{\partial y_1} I(y, \dot{y}_{34}, \ddot{y}_{34}, r) = \psi_1(\cdot);$$

$$s_2 = \frac{\partial}{\partial y_2} I(y, \dot{y}_{34}, \ddot{y}_{34}, r) = \psi_2(\cdot),$$

где $\psi_1(\cdot)$, $\psi_2(\cdot)$ – функции чувствительности для соответствующих оценок $\tilde{y}_1, \tilde{y}_2$.

Геометрический смысл функций $\psi_1(\cdot)$, $\psi_2(\cdot)$ можно описать качественно. На рис. 4 представлена двумерная поверхность отклика функции (5) $I(y_1, y_2)$. Варьируемыми переменными являются искомые приближения, обеспечивающие минимум меры рассогласования. В окрестности точки минимума выделена некоторая область $G \subset R^2$, в частности, круг радиусом ε . Кривая, выделяющая область G , отражает меру характеристической близости достигнутой точки к точному минимуму. Двумерная гауссова форма имеет вид

$$I(y_1, y_2) = I_0 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(y_1 - a_0)^2 - (y_2 - b_0)^2}{2\sigma_1^2}\right].$$

Для простоты параметры размаха кривой гаусса приняты одинаковыми: $\sigma_1 = \sigma_2$. В этом случае область G является кругом радиусом ε^σ , связанным с характеристическим параметром. Производная

$$\frac{\partial I}{\partial \varepsilon} = \lim_{\Delta \varepsilon \rightarrow 0} \frac{I(\cdot, \varepsilon + \Delta \varepsilon) - I(\cdot, \varepsilon)}{\Delta \varepsilon} = \psi(\cdot)$$

представляет собой антиградиент функции (5), вычисленный на граничных точках области G . Поэтому чем больше модуль

антиградиента, тем глубже минимум и больше чувствительность данной системы оценивания. Однако функцию $I(y_1, y_2)$, так же как и глубину её точки минимума, определяет ряд параметров модели, влияние которых на чувствительность невелико, тем более, что диапазоны изменения этих параметров, как правило, ограничиваются технологическим регламентом. В данном случае с учётом состояния системы (1) при номинальном векторе режимных переменных получены значения $\psi_1^H = 0,64$; $\psi_2^H = 0,47$.

Точность. Вопрос точности косвенных оценок или уровень погрешности результатов также неотъемлемо связан с решением в системе расчётно-поисковой задачи минимизации. Классический подход к оцениванию погрешностей при косвенном измерении основан на кумулятивном характере их передачи на общий результат измерения [18–20]. Коэффициенты передачи пропорциональны частным производным, взятым по результатам каждого прямого измерения. Абсолютную погрешность общего результата косвенного измерения, обусловленную погрешностью прямого измерения i -й режимной переменной r_i , определим по формуле

$$\Delta_{yi} = \pm \Delta_{ri} \frac{\partial I}{\partial r_i}, \quad i = \overline{1, K},$$

где Δ_{ri} – абсолютная погрешность результата прямого измерения переменных r_i .

Получение частных производных в фиксированных моментах времени, как и производных функции (5) по аргументам y_1, y_2 , неудобно в связи с громоздкостью указанного выражения, но вполне реализуемо с привлечением численных алгоритмов. Предпочтительнее использовать процедуру вычисления частных производных от неявно заданной функции многих переменных [21]:

$$(y_i)'_{r_j} = - \frac{\partial y_i}{\partial r_j} = - \frac{I'_{y_i}(\mathbf{y}^*, \mathbf{r}^*)}{I'_{r_j}(\mathbf{y}^*, \mathbf{r}^*)}; \quad i = \overline{1, 2}; \quad j = \overline{1, K};$$

$$I'_{y_i}(\mathbf{y}^*, \mathbf{r}^*) = \left. \frac{\partial I(\mathbf{y}, \mathbf{r})}{\partial y_i} \right|_{\mathbf{y}^*, \mathbf{r}^*};$$

$$I'_{r_j}(\mathbf{y}^*, \mathbf{r}^*) = \left. \frac{\partial I(\mathbf{y}, \mathbf{r})}{\partial r_j} \right|_{\mathbf{y}^*, \mathbf{r}^*},$$

где звездочки означают векторы, существующие в заданный момент времени.

Кумулятивная абсолютная погрешность косвенного измерения без учёта погрешности расчётов по приближению минимума функции (5) и погрешности конечно-разностной аппроксимации компонент векторов производных $\dot{\mathbf{y}}_{34}, \ddot{\mathbf{y}}_{34}$ может быть выражена в виде [20, 22]:

$$\Delta_y = \pm \left[\sum_{i=3}^4 \left(\frac{\partial I}{\partial y_i^*} \right)^2 \Delta_{y_i^*}^2 + \sum_{i=3}^4 \left(\frac{\partial I}{\partial \dot{y}_i^*} \right)^2 \Delta_{\dot{y}_i^*}^2 + \sum_{i=3}^4 \left(\frac{\partial I}{\partial \ddot{y}_i^*} \right)^2 \Delta_{\ddot{y}_i^*}^2 + \sum_{j=1}^K \left(\frac{\partial I}{\partial r_j^*} \right)^2 \Delta_{r_j^*}^2 \right]^{1/2}.$$

Учёт погрешности приближения к точному минимуму согласно теории итеративных алгоритмов нелинейного программирования основан на учёте точности (погрешности) по аргументу $\delta_{\text{арг}}$ и по функционалу. Погрешность $\delta_{\text{арг}}$ должна соответствовать классу точности измерительных приборов, а именно – систем измерения температуры.

При задании точности по значению функции рассогласования, что характерно для большинства алгоритмов нелинейного программирования, радиус ε отклонения от центра в этом случае можно оценить линейным приближением. Воспользуемся модулем вектора градиента в завершающей точке релаксационного процесса приближения к минимуму и его направлением, проецированным на плоскость (y_1, y_2) , которое определено углом α :

$$\|\text{grad} I\| \cos \alpha \approx \varepsilon = \delta_f,$$

где δ_f – погрешность, вызванная неточностью результата решения задачи НП по функции рассогласования.

Погрешности $\delta_{\dot{y}_i}, \delta_{\ddot{y}_i}$ обусловлены неточностью аппроксимации производных $\dot{\mathbf{y}}_{34}, \ddot{\mathbf{y}}_{34}$ и никак не коррелированы с погрешностями результатов решения задачи НП. Этот источник погрешности, относящийся также к сфере процессов вычислений, принято связывать с погрешностью алгоритмов интерполирования. В теории интерполяции с равномерным шагом дискретности минимизация этого шага сопровождается уменьшением погрешности только до того момента, когда среднее приращение функции становится соизмеримым с погрешностью табличного задания интерполируемой функции [23], т. е. соизмеримым с погрешностью измерения. Таким образом, результирующая погрешность примет вид

$$\delta = \pm \sqrt{\Delta_y^2 + \delta_f^2 + \delta_{\dot{y}_i}^2 + \delta_{\ddot{y}_i}^2}.$$

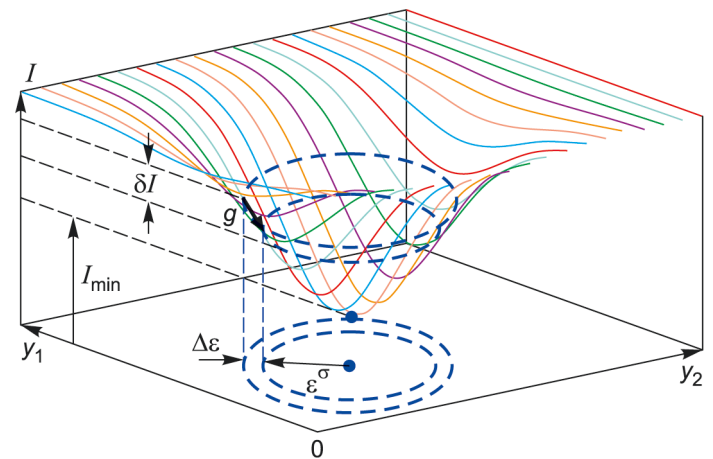


Рис. 4. Мера характеристической близости к точному минимуму и геометрическое представление чувствительности метода косвенного оценивания

Fig. 4. A measure of proximity to an exact minimum and a geometric representation of the sensitivity of the proposed indirect estimation method

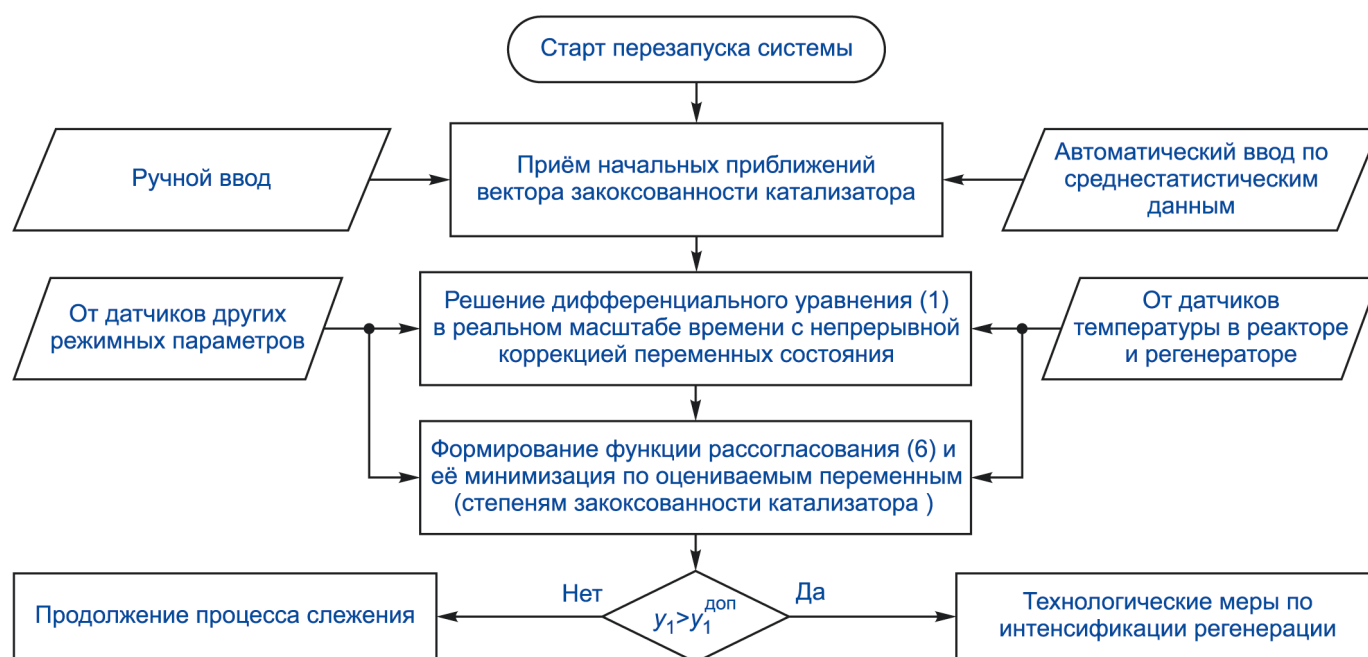


Рис. 5. Функционально-алгоритмическая структура системы мониторинга степени закоксованности катализатора на основе компьютерной симуляции в динамике со сравнением семейств траекторий свободных движений в пространстве состояний; $y_1^{\text{доп}}$ – допустимое значение закоксованности катализатора

Fig. 5. Functional-algorithmic structure of the system for monitoring the degree of coking of a catalyst based on computer simulation in dynamics with a comparison of the trajectories of families of free motions in the state space; $y_1^{\text{доп}}$ – permissible value of the coking of the catalyst

Мониторинг содержания глубинного кокса после регенерации катализатора. Состояние катализатора с точки зрения степени закупоренности микроканалов пористой структуры в промышленных условиях можно оценить только по лабораторным анализам. Глубинный кокс, блокирующий активные центры каталитической системы, имеет значительное влияние на результаты химических процессов в PPC и существенно влияет на формирование составов углекислоты и монооксида углерода в дымовых газах регенерации. Система достаточно сильно чувствительна к уровню глубинного кокса по каналу коксуетости катализатора, что ярко проявляется в модели коксового баланса (1). В этой связи эффективной является система мониторинга степени восстановленности катализатора в динамике течения процессов в PPC, основанная на предлагаемой методике косвенного измерения содержания кокса в выходных потоках аппаратов PPC.

В разработанной самонастраивающейся системе отслеживания степени глубинной закоксованности катализатора после регенерации, состоящей из блоков имитации траекторий тепловых движений PPC и формирования функции рассогласования в траекториях, необходимо задавать начальные состояния катализатора (рис. 5). Предусмотрены автоматический и ручной режимы задания начальных данных для запуска системы имитации. Автоматический режим может функционировать в рамках процедур статистической обработки данных измерительной информации по алгоритмам выделения статических взаимосвязей между переменными. Точный контроль технологического режима обеспечивается по абсолютному

минимуму оценок остаточной закоксованности катализатора после регенерации и закоксованности в выходном потоке из зоны реакции. Автоматизация контроля термического состояния касается как оценивания состояния катализатора и выбора оптимального технологического режима, так и выполнения экстренных мер, когда закоксованность катализатора может превышать допустимое значение $y_1^{\text{доп}}$.

Заключение. Объектами проведения технологических измерений нередко являются динамические процессы с достаточно высокой степенью детерминизма. Типичными примерами можно считать тепловые модели процессов, осуществляемых в PPC химической технологии. Проблему косвенного оценивания не поддающихся к прямому измерению переменных состояния таких объектов составляет в основном нелинейность системы, экстраординарным проявлением которой является неединственность состояний при одних и тех же входных (режимных) параметрах. Если линейные системы в их фазовых пространствах определены однозначно, то для нелинейных систем это утверждение не сохраняет силу и возникает необходимость расширения пространства состояний с включением в функцию индикации, фигурирующей в рамках задачи поиска приближений, также производных высших порядков. Предложенная активная симуляция с функцией рассогласования, которая включает вторые производные от переменных состояния, может оказаться одним из способов надёжного решения описанной проблемы. Оценивание чувствительности и точности результатов приобретает в данном случае особое значение, поскольку подобного рода объекты

и процессы сильно отличаются характерами нелинейностей, т. е. топологическими особенностями семейств траекторий свободных движений в пространстве состояний.

Список литературы

1. Elnashaie S. S., El-Hennawi I. M., *Chem. Eng. Sci.*, 1979, vol. 34, no. 9, pp. 1113–1118.
2. Wgialla R. M., Helal A. M., Elnasaie S. S., *Math. and Comput. Model.*, 1991, vol. 15, no. 1, pp. 17–22.
3. Буровой И. А., Мамедов А. А. Построение структуры модели для идентификации одного класса гетерогенных каталитических процессов // Автоматика и телемеханика. 1970. Т. 31. № 7. С. 100–105.
4. Бесков В. С., Нагиев А. Г., Юсифов Р. Ю. Оптимизация ХТС с учетом множественности и устойчивости стационарных состояний // Тезисы докладов Научной конференции «Методы кибернетики химико-технологических процессов». М.: ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1984. С. 106–107.
5. Nagiev A. G., *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2000, vol. 34, no. 3, pp. 274–280. <https://doi.org/10.1007/BF02755975>
6. Xilei Wang, Ning Li, Shaoyuan Li, *36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, 2017, pp. 4034–4039. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8027989>
7. Крылов В. А., Ходяшев Н. Б., Подвинцев И. Б., Болотова Е. С., Чиркова Н. А. Влияние характера коксовых отложений на показатели работы платино-рениевого катализатора риформинга // Нефтепереработка и нефтехимия. 2013. № 5. С. 14–18.
8. Nagiev A. G., Khalilov S. A., Agaev U. K., Guseinova A. S., *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76 (12), pp. 2233–2240. <https://doi.org/10.1134/S0005117915120127>
9. Mouzinho L. F., Fonseca Neto J. V. et al., Practical aspects for design of indirect measurement in dynamic systems, *Proceeding XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development*, September, 17–22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 46–52.
10. Jonas Linder and Martin Enqvist, *International Journal of Control*, 2017, vol. 90, no. 4, pp. 729–745. <https://doi.org/10.1080/00207179.2016.1222557>
11. Liya Huang, Zhong Wu, Kan Wang, *Sensors*, 2018, vol. 18 (6), p. 1873. <https://doi.org/10.3390/s18061873>
12. Gauthier T., Bayle J., Leroy P., FCC: Fluidization Phenomena and Technologies, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2000, vol. 55, no. 2, pp. 187–207.
13. Браммер К., Зиффлинг Г. Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация: Пер. с нем. В. Б. Колмановского. М.: Наука, 1982. 199 с.
14. Nagiev A. G., Nagiev G. A., Gulieva N. A., *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019, vol. 53 (1), pp. 29–42. <https://doi.org/10.1134/S0040579519010111>
15. Сю Д., Мейер А. У. Современная теория автоматического управления и её применение: Пер. с англ. В. С. Бочкова и др. / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Ю. И. Топчиева. М.: Машиностроение, 1972. 544 с.
16. Мирошник И. В. Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005. 335 с.

17. Поляк Б. Т., Хлебников М. В., Рапопорт Л. Б. Математическая теория автоматического управления. М.: URSS, 2019, 500 с.
18. Жуков В. К. Теория погрешностей технических измерений. Томск: Томский политехнический университет, 2007. 180 с.
19. Земельман М. А. Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991. 288 с.
20. Панфилов В. А. Электрические измерения. М.: Академия, 2013. 288 с.
21. Фихтенгольц Г. М. Основы математического анализа. В 2-х томах. Т. 1. М.: Наука, 1964. 440 с.
22. Миронов Э. Г., Бессонов Н. П. Метрология и технические измерения. М.: Кнорус, 2015, 422 с.
23. Федоренко Р. П. Введение в вычислительную физику. М.: Изд-во МФТИ, 1994, 528 с.

References

1. Elnashaie S. S., El-Hennawi I. M., *Chem. Eng. Sci.*, 1979, vol. 34, no. 9, pp.1113–1118.
2. Wgialla R. M., Helal A. M., Elnasaie S. S., *Math. and Comput. Model.*, 1991, vol. 15, no. 1, pp. 17–22.
3. Burovoi I. A., Mamedov A. A., Constructing Model Structure for Identification of Certain Class of Heterogeneous Catalytic Processes, *Automation and Remote Control*, 1970, vol. 31, no. 7, pp. 100–105. (In Russ.)
4. Beskov V. S., Nagiev A. G., Yusifov R. Yu., Optimizaciya HTS s uchetom mnozhestvennosti i ustojchivosti stacionarnyh sostoyanij, *Abstracts of the National conference reports “Metody kibernetiki himiko-tekhnologicheskikh processov”*, Moscow, CNIITENEFTKHM Publ., 1984, pp. 106–107. (In Russ.)
5. Nagiev A. G., *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2000, vol. 34, no. 3, pp. 274–280. <https://doi.org/10.1007/BF02755975>
6. Xilei Wang, Ning Li, Shaoyuan Li, *36th Chinese Control Conference (CCC)*, Dalian, 2017, pp. 4034–4039. <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8027989>
7. Krylov V. A., Hodyashev N. B., Podvintsev I. B., Bolotova E. S., Chirkova N. A., Influence of character of coking depositions on indexes of work platinum-perrenic reforming catalyst, *Neftepererabotka i neftekhimiya*, 2013, no. 5, pp. 14–18. (In Russ.)
8. Nagiev A. G., Khalilov S. A., Agaev U. K., Guseinova A. S., *Automation and Remote Control*, 2015, vol. 76 (12), pp. 2233–2240. <https://doi.org/10.1134/S0005117915120127>
9. Mouzinho L. F., Fonseca Neto J. V. et al., Practical aspects for design of indirect measurement in dynamic systems, *Proceeding XVIII IMEKO World Congress, Metrology for a Sustainable Development*, September, 17–22, 2006, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 46–52.
10. Jonas Linder and Martin Enqvist, *International Journal of Control*, 2017, vol. 90, no.4, pp. 729–745. <https://doi.org/10.1080/00207179.2016.1222557>
11. Liya Huang, Zhong Wu, Kan Wang, *Sensors*, 2018, vol. 18 (6), p. 1873. <https://doi.org/10.3390/s18061873>
12. Gauthier T., Bayle J., Leroy P., FCC: Fluidization Phenomena and Technologies, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, 2000, vol. 55, no. 2, pp. 187–207.

13. Karl Brammer, Gerhard Siffling, *Kalman-Bucy-filter*, Norwood, MA, Artech House, 1989, 391 p.
14. Nagiev A. G., Nagiev G. A., Gulieva N. A., *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2019, vol. 53 (1), pp. 29–42. <https://doi.org/10.1134/S0040579519010111>
15. Jay C. Hsu, Andrew U. Meyer, *Modern control principles and applications*, New York, McGraw-Hill, 1968.
16. Miroshnik I. V., *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Linejnye sistemy*, S. Petersburg, Piter Publ., 2005, 335 p. (In Russ.)
17. Polyak B. T., Khlebnikov M. V., Rapoport L. B., *Matematicheskaya teoriya avtomaticheskogo upravleniya*, Moscow, URSS Publ., 2019, 500 p. (In Russ.)
18. Zhukov V. K., *Teoriya pogreshnostej tekhnicheskikh izmerenij*, Tomsk, Tomskij politekhnicheskij universitet Publ., 2007, 180 p. (In Russ.)
19. Zemelman M. A., *Metrologicheskie osnovy tekhnicheskikh izmerenij*, Moscow, Izdatelstvo standartov Publ., 1991, 288 p. (In Russ.)
20. Panfilov V. A., *Elektricheskie izmereniya*, Moscow, Akademiya Publ., 2013, 288 p. (In Russ.)
21. Fichtenholz G. M., *Osnovy matematicheskogo analiza*, in 2 volumes, vol. 1, Moscow, Nauka Publ., 1964, 440 p. (In Russ.)
22. Mironov E. G., Bessonov N. P., *Metrologiya i tekhnicheskie izmereniya*, Moscow, Knorus Publ., 2015, 422 p. (In Russ.)
23. Fedorenko R. P., *Vvedenie v vychislitel'nyy fiziku*, Moscow, Izdatelstvo MFTI Publ., 1994, 528 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 02.10.2020; принята к публикации 26.02.2021.

Реализация метода оптимальной автоподстройки шкалы времени атомных часов

Константин Геннадьевич Мишагин^{1✉}, Сергей Юрьевич Медведев²

^{1, 2} ЗАО «Время-Ч», Н. Новгород, Россия

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия

¹mishagin@vremya-ch.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-5989-653X>

²medvedev@vremya-ch.com

Аннотация. Рассмотрена задача физической реализации на рабочих и вторичных эталонах шкал атомного времени, максимально приближенных к национальной шкале времени UTC(SU). Представлены результаты анализа установившегося режима автоподстройки шкалы времени водородного стандарта частоты относительно UTC(SU). Использован дифференциальный метод сравнения шкал времени на основе кодовых измерений сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. Рассчитаны параметры фильтра Калмана и линейно-квадратичного регулятора. Представлено сравнение теоретических и экспериментальных оценок характеристик погрешности автоподстройки. Полученные результаты можно применять для повышения точности ведения шкал времени рабочих и вторичных эталонов.

Ключевые слова: шкала времени, стандарт частоты и времени, атомные часы, нестабильность частоты, вариация Аллана, синхронизация, линейно-квадратичное гауссовское управление

Для цитирования: Мишагин К. Г., Медведев С. Ю. Реализация метода оптимальной автоподстройки шкалы времени атомных часов // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 51–55. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-51-55>

Implementation of optimal automatic steering of atomic clock timescale

Konstantin G. Mishagin^{1✉}, Sergey Yu. Medvedev²

^{1, 2} Vremya-CH JSC, N. Novgorod, Russia

¹ Nizhny Novgorod State University, N. Novgorod, Russia

¹mishagin@vremya-ch.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-5989-653X>

²medvedev@vremya-ch.com

Abstract. The problem of physical implementation of atomic timescales maximally adjusted to the national timescale UTC(SU) for working and secondary standards is considered. Results of analysis of stationary process of hydrogen maser timescale automatic steering to UTC(SU) using common view technique based on the signals of global navigational systems are presented. Calculation of Kalman filter and linear quadratic regulator parameters is described. Theoretical and experimental estimations of automatic steering quality characteristics are compared and discussed. The results obtained can be used to improve the accuracy of timescales on working and secondary standards.

Keywords: time scale, frequency standard, atomic clock, frequency stability, Allan variance, synchronization, Linear Quadratic Gaussian control

Введение. Физическая реализация на рабочих и вторичных эталонах шкал атомного времени, максимально приближенных к национальной шкале времени UTC(SU), представляется важной задачей, решение которой необходимо для обеспечения единства измерений. Для физической реализации шкалы времени, как правило, используют вспомогательные генераторы AOG-110 (Microchip Technology, USA), HROG-5 (SpectraDynamics, USA), Ч7-317 (ЗАО «Время-Ч», Россия), стабилизированные по частоте сигналом атомных часов. Такие генераторы позволяют вводить поправки по

фазе и частоте относительно сигнала атомных часов. Реализовать управление шкалой времени можно и с помощью только одних атомных часов: для подстройки фазы и частоты достаточно коррекции кода встроенного синтезатора частоты. Однако в этом случае из-за возмущения в результате управляющего воздействия оценка нестабильности частоты и других характеристик атомных часов усложняется.

В задаче реализации шкалы времени, приближенной к UTC(SU), принципиально важен канал передачи измерительной информации от Государственного первичного

эталона единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018. При этом имеет значение не только точность сравнения, но и задержка при получении измерительной информации. Наиболее доступный способ передачи сигналов времени и частоты, обладающий приемлемой для атомных часов задержкой, основан на использовании специализированных приёмников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). При реализации дифференциального метода даже кодовые измерения (без использования информации о фазе несущего сигнала) позволяют получить случайную погрешность сравнения шкал времени территориально разнесённых эталонов менее 1 нс. Дифференциальный метод сравнения с ГЭТ 1-2018 возможен благодаря открытому доступу (предоставлен ВНИИФТРИ) к данным измерений сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS относительно сигнала национальной шкалы времени UTC(SU) в стандартизированном формате CGGTTS 02 [1].

Водородные стандарты активного типа являются основным средством хранения национальных шкал атомного времени в ведущих лабораториях мира [2]. В последнее время характеристики таких стандартов производства ЗАО «Время-Ч» заметно улучшены, получены рекордные показатели долговременной нестабильности частоты менее $3 \cdot 10^{-16}$ за сутки и менее $4 \cdot 10^{-16}$ в интервале времени измерения 1 месяц. Малый и стабильный дрейф частоты позволяет построить высокоточную модель поведения шкалы времени таких стандартов. Это значительно упрощает задачу воспроизведения UTC(SU), так как при достаточно точной начальной настройке шкала времени водородного стандарта активного типа может без какого-либо управления длительное время находиться в заданных пределах

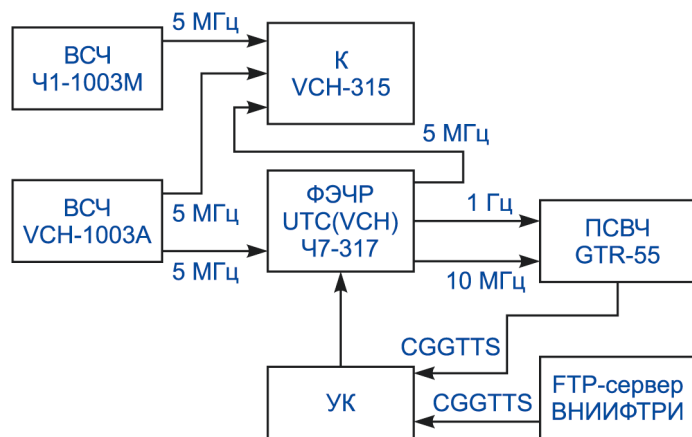


Рис. 1. Схема автоподстройки шкалы времени UTC(VCH) относительно UTC(SU):

BC4 – водородный стандарт частоты; К – компаратор; ФЭЧР – формирователь эталонных частот резервируемый; ПСВЧ – приёмник сигналов времени и частоты ГНСС; УК – управляющий компьютер

Fig. 1. Scheme of the setup for automatic steering of the timescale UTC(VCH) to UTC(SU):

AHM – active hydrogen maser; FC – frequency comparator; MCS – microstepper combiner synthesizer; TFGR – time and frequency GNSS receiver; C – computer

отклонения по фазе относительно национальной шкалы времени. Тем не менее, такой подход требует контроля со стороны высококвалифицированного специалиста.

К сигналам шкалы атомного времени рабочих и вторичных эталонов в зависимости от области применения могут предъявляться различные требования. Кроме точности воспроизведения UTC(SU) важнейшей характеристикой является нестабильность частоты [3]. Для уменьшения нестабильности частоты сигналов шкалы времени управление параметрами этих сигналов должно быть достаточно плавным и оптимально учитывать характеристики подстраиваемого и опорного сигналов. Одним из известных методов оптимального управления, применяемых для подстройки шкал атомного времени, является метод линейно-квадратичного гауссовского управления [4]. В [5] описан алгоритм расчёта параметров линейно-квадратичного регулятора при известных статистических характеристиках опорного и измеряемого сигналов.

Цель работы – демонстрация применения алгоритма расчёта параметров линейно-квадратичного регулятора [5] на практике и анализ результатов работы системы автоподстройки по рассчитанным параметрам. Рассмотренный метод полностью автоматического управления применим не только к наиболее точным водородным стандартам частоты активного типа, но и к любым другим атомным часам.

Описание эксперимента автоподстройки локальной шкалы времени относительно UTC(SU). Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве источника формирования локальной шкалы времени, которую условно обозначим UTC(VCH), выступает активный водородный стандарт частоты (BC4) VCH-1003A. Шкала времени реализуется на выходе вспомогательного генератора – формирователя эталонных частот резервируемого (ФЭЧР) 47-317. Сигналы шкалы времени (импульсный сигнал 1 Гц и синусоидальный сигнал 10 МГц) поступают на приёмник сигналов времени и частоты (ПСВЧ) ГНСС GTR-55. Результаты измерений шкалы UTC(VCH) относительно шкал ГНСС по каждому доступному спутнику поступают от ПСВЧ на управляющий компьютер ежесуточно в формате CGGTTS. Также на компьютер каждые сутки поступают данные CGGTTS с FTP-сервера ВНИИФТРИ. При совместной обработке файлов от ПСВЧ и приёмника ГЭТ 1-2018, доступных на FTP-сервере ВНИИФТРИ, вычисляется разность шкал UTC(VCH)–UTC(SU) с интервалами между отсчётами 16 мин. Так как расстояние от Н. Новгорода до г. п. Менделеево Московской обл. (ВНИИФТРИ) относительно небольшое (421 км), то суточные изменения задержки в ионосфере при распространении сигналов от спутников ГНСС до лабораторий являются коррелированными и в значительной степени вычитаются при дифференциальной обработке. В данном случае погрешность дифференциального сравнения шкал по коду L1C меньше, чем при использовании безионосферной комбинации L3, поэтому в эксперименте использовали данные для L1C. При дифференциальном методе сравнения остаются суточные колебания, амплитуда которых достигает 1 нс. Результаты сравнения обрабатываются фильтром Калмана, с помощью

которого вычисляется разность фаз и частот на момент окончания предыдущих суток. По полученным данным экстраполируется отклонение по фазе на момент времени управления 12:00:00 (UTC) текущих суток. Частота ФЭЧР Ч7-317 корректируется по формуле [4, 5]:

$$u_n = -g_x \hat{x}_n - g_y \hat{y}_n,$$

где u_n – значение коррекции; $\hat{x}_n, \hat{y}_n$ – оценки отклонения по фазе и частоте на n -й момент времени управления; g_x, g_y – коэффициенты управления.

Модель системы автоподстройки шкалы времени. Модель процесса отклонения шкалы времени и модель измерений описываются следующими уравнениями:

$$\mathbf{X}_{n+1} = F \mathbf{X}_n + B u_n + \mathbf{w}_n; \quad \mathbf{z}_n = H \mathbf{X}_n + \mathbf{v}_n;$$

$$u_n = -G \hat{\mathbf{X}}_n, \quad G = [g_x \ g_y];$$

$$\mathbf{X}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{X}}_n = \begin{bmatrix} \hat{x}_n \\ \hat{y}_n \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \Delta t \\ 1 \end{bmatrix}, \quad H = [1 \ 0],$$

$$Q = \langle \mathbf{w}_n \mathbf{w}_n^T \rangle = \begin{bmatrix} q_1 \Delta t + q_2 \frac{(\Delta t)^3}{3} & q_2 \frac{(\Delta t)^2}{2} \\ q_2 \frac{(\Delta t)^2}{2} & q_2 \Delta t \end{bmatrix}, \quad R = \langle \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^T \rangle = q_0,$$

где $\mathbf{z}_n = [z_n]$ – измеренное значение отклонения шкалы времени UTC(VCH) относительно UTC(SU); x_n, y_n – компоненты вектора состояния модели процесса; Δt – интервал времени измерения.

Значения коэффициентов (q_0, q_1, q_2) матриц ковариации шума модели процесса Q и измерений R [3] можно оценить путём аппроксимации графиков девиации Аллана (рис. 2) следующей зависимостью:

$$\sigma(\tau) = \sqrt{\frac{3q_0}{\tau^2} + \frac{q_1}{\tau} + \frac{q_2}{3}\tau}, \quad (1)$$

где τ – интервал времени измерения.

Коэффициент шума измерений (белого фазового шума) q_0 определяется при аппроксимации зависимостью (1) кривой 3 (см. рис. 2), соответствующей нестабильности разности частот шкал UTC(VCH)–UTC(SU). Коэффициенты белого частотного шума q_1 и шума случайных блужданий частоты q_2 определяются по кривой 2 (см. рис. 2), соответствующей нестабильности частоты ВСЧ VCH-1003A (дрейф частоты исключён), измеренной относительно ВСЧ Ч1-1003М, обладающего лучшими характеристиками нестабильности частоты в сравнении с ВСЧ VCH-1003A. В результате получены следующие значения:

$$q_0 = 3,5 \cdot 10^{-19}, \quad q_1 = 3 \cdot 10^{-26}, \quad q_2 = 8 \cdot 10^{-36}.$$

Значения q_0, q_1, q_2 используются при расчёте параметров фильтра Калмана [6]:

$$\hat{\mathbf{X}}_{n+1} = F \hat{\mathbf{X}}_n + B u_n + K_{n+1} [\mathbf{z}_{n+1} - H(F \hat{\mathbf{X}}_n + B u_n)].$$

Расчёт параметров системы автоподстройки. Для расчёта коэффициентов петли g_x, g_y использован алгоритм для линейно-квадратичного регулятора, описанный в [5]. Согласно этому алгоритму следует определить интервал времени измерения на графике нестабильности частоты, соответствующий точке пересечения кривых для опорного сигнала и свободного генератора (см. рис. 2, кривые 3, 2). Данный интервал $\tau_x \approx 5 \cdot 10^5$ с. В [5] рекомендуется выбрать постоянную времени петли $T = \alpha_x \tau_x$, где $0,1 < \alpha_x < 1$ (α_x – коэффициент пропорциональности). Предполагается, что опорный сигнал в интервале τ_x содержит преимущественно белый фазовый шум, поэтому можно было бы выбрать значение $\alpha_x < 1$ для достижения наилучшей характеристики долговременной нестабильности частоты управляемого генератора [5]. Однако для эксперимента было выбрано значение $\alpha_x = 1$ в силу того, что для обеспечения плавной автоподстройки необходимо выполнить условие $\Delta t_{\text{упр}} \ll T$, где $\Delta t_{\text{упр}} = 86400$ с – интервал управления. Интервал управления не может быть меньше, так как период обновления файлов CGGTTS на FTP-сервере ВНИИФТРИ составляет сутки. В результате для постоянной времени петли $T = 5 \cdot 10^5$ с получены коэффициенты линейно-квадратичного регулятора $g_x \approx 5,8 \cdot 10^{-7}, g_y \approx 0,29$

Теоретическая оценка параметров качества работы системы автоподстройки. Проведём теоретическую оценку следующих характеристик работы системы автоподстройки: статической ошибки по фазе, среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок по фазе, частоте и СКО управляющих воздействий (коррекций частоты).

Статическая ошибка по фазе обусловлена дрейфом частоты подстраиваемого стандарта. Рассматриваемая система

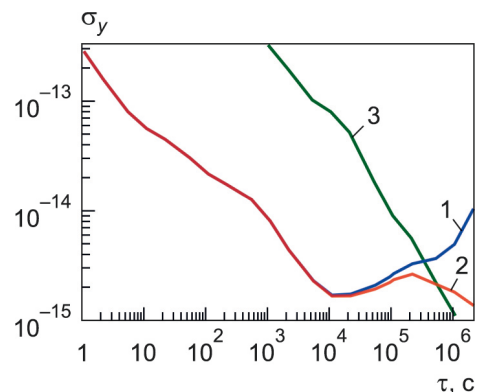


Рис. 2. Девиация Аллана сигналов:

1 – свободного генератора без исключения линейного дрейфа частоты; 2 – свободного генератора при исключённом линейном дрейфе частоты; 3 – генератора в режиме автоподстройки по данным измерений относительно UTC(SU)

Fig. 2. Allan deviation:

1 – free-running clock without frequency drift removal; 2 – free-running clock, linear frequency drift removed; 3 – clock steered to UTC(SU)

автоподстройки [5] обладает астатизмом второго порядка, и в случае линейного дрейфа частоты D статическая ошибка по частоте равна нулю, при этом статическая ошибка по фазе отлична от нуля. Используем выражение для передаточной функции по частоте разомкнутой системы, представленное в [5], связь Z-образов ошибок по фазе и частоте, а также теорему

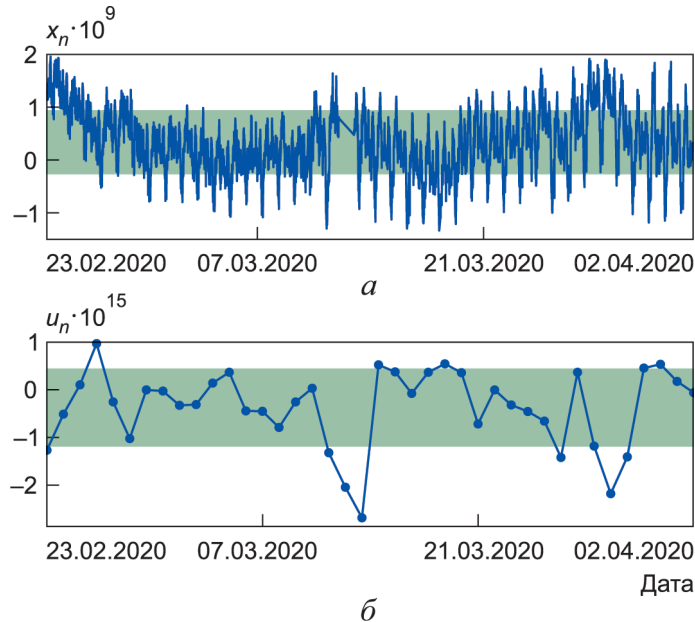


Рис. 3. Отклонение шкалы времени UTC(VCH) относительно UTC(SU) по фазе x_n (а) и коррекция частоты u_n (б) после переходного процесса

Fig. 3. Phase offset of UTC(VCH) with respect to UTC(SU) x_n (a) and frequency corrections u_n (b) after transient process

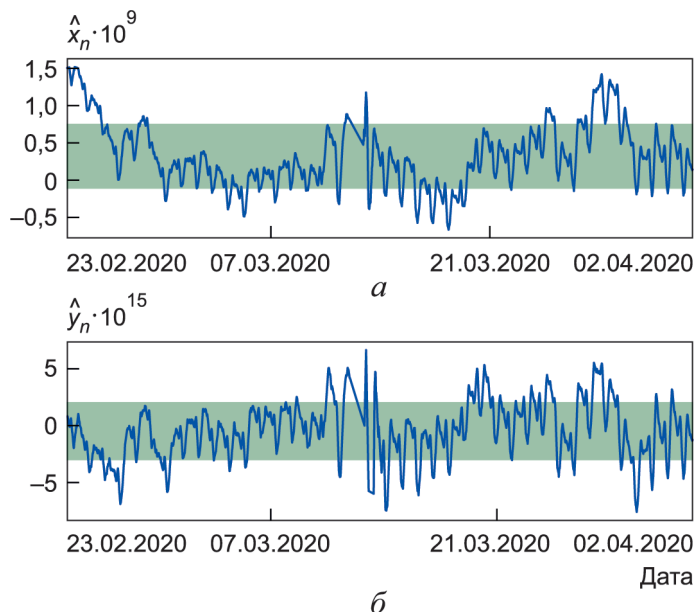


Рис. 4. Оценки отклонений шкалы времени UTC(VCH) относительно UTC(SU) с помощью фильтра Калмана по фазе $\hat{x}_n$ (а) и частоте $\hat{y}_n$ (б)

Fig. 4. Phase $\hat{x}_n$ (a) and frequency $\hat{y}_n$ (b) offsets of UTC(VCH) with respect to UTC(SU) estimated by Kalman filter

о предельном значении для Z-преобразования и получим следующее выражение статической ошибки по фазе:

$$x_{\text{ст}} = D\Delta t_{\text{упр}}/g_x.$$

Оценка дрейфа частоты подстраиваемого стандарта в суточном интервале управления составляет $D\Delta t_{\text{упр}} \approx 3,9 \cdot 10^{-16}$, тогда статическая ошибка по фазе $x_{\text{ст}} \approx 0,67$ нс.

Для оценки СКО ошибок по фазе и частоте можно воспользоваться результатами работы [7]. Для рассматриваемой системы линейно-квадратичного гауссовского управления получим следующие дискретные уравнения Ляпунова:

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_{\Delta x} &= A(I - KH)\Sigma_{\Delta x}[A(I - KH)]^T + AKRK^T A^T + Q, \\ \Sigma_x &= A\Sigma_x A^T + KH\Sigma_{\Delta x}H^T K^T + KRK^T, \quad A = F - BG, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Sigma_{\Delta x}$ – ковариационная матрица ошибок предсказания в фильтре Калмана; Σ_x – матрица, диагональные элементы которой содержат искомые дисперсии ошибок по фазе и частоте в установившемся режиме работы системы автоподстройки. В (2) исправлена опечатка из [7].

СКО коррекций частоты можно оценить, используя выражение из [7]:

$$\sigma_u = \sqrt{G\Sigma_x G^T}. \quad (3)$$

В теоретической модели, на которой основаны формулы (2), (3), предполагается равенство интервала управления и интервала измерения: $\Delta t_{\text{упр}} = \Delta t$. В эксперименте это условие не выполнено: $\Delta t_{\text{упр}} = 1$ сут, $\Delta t = 16$ мин. Кроме этого в эксперименте управление вводилось с задержкой в 12 ч после получения данных измерений с использованием экстраполяции оценок отклонения фазы и частоты. Тем не менее, результаты теоретического расчёта, представленные в таблице, качественно согласуются с результатами эксперимента.

Результаты эксперимента. Время наблюдения системы автоподстройки в установившемся режиме составило 42 дня. На рис. 3 представлены графики отклонения шкалы UTC(VCH) относительно UTC(SU) и коррекций частоты ФЭЧР 47-317 в установившемся режиме автоподстройки. Разрыв на графике отклонения шкалы (см. рис. 3, а) связан с техническими работами на предприятии и выключением ПСВЧ GTR-55 12.03.2020 г. По графику на рис. 3, а проведена оценка статической ошибки по фазе, по графику на рис. 3, б – СКО коррекций частоты (таблица).

Сравнение теоретических и экспериментальных оценок характеристик работы системы автоподстройки шкалы времени в установившемся режиме

Параметр	Теория	Эксперимент
Статическая ошибка по фазе, нс	0,7	0,3
СКО ошибки по фазе, нс	0,5	0,4
СКО ошибки по частоте	10^{-15}	$2,2 \cdot 10^{-15}$
СКО коррекций частоты	$7 \cdot 10^{-16}$	$8 \cdot 10^{-16}$

На рис. 4 представлены графики оценок отклонений шкалы и частоты UTC(VCH) относительно UTC(SU), полученных с помощью фильтра Калмана. По этим графикам рассчитаны СКО ошибок по фазе и частоте, приведённые в таблице.

Заметное отличие полученных теоретических и экспериментальных оценок статической ошибки фазы и СКО ошибки по частоте (см. таблицу) предположительно вызвано не отличиями модели от условий эксперимента, описанными в предыдущем разделе, а следующими факторами. Отличие оценки статической ошибки вероятно вызвано изменением дрейфа частоты ВСЧ VCH-1003A в ходе эксперимента. Большее значение СКО ошибки по частоте, измеренное в эксперименте, вероятно связано с суточными вариациями, заметными на графиках (см. рис. 4). При дифференциальной обработке измерений вариации, связанные с изменением задержки в ионосфере, компенсируются не полностью. Такие суточные колебания задержки не учитываются в используемой модели измерений, что приводит к меньшему значению теоретической оценки СКО ошибки по частоте.

Заключение. Метод линейно-квадратичного гауссовского управления при использовании данных в открытом доступе, предоставляемых ВНИИФТРИ, позволяет формировать локальные шкалы времени со случайной погрешностью менее 1 нс. Представляется перспективным использование описанной в работе методики для автоматического ведения шкал времени рабочих и вторичных эталонов времени и частоты. Необходимо отметить, что в эксперименте в качестве источника сигнала шкалы времени использован активный водородный стандарт предыдущего поколения VCH-1003A, который значительно уступает по характеристикам активным водородным стандартам нового типа [2], и скорее ближе по долговременной нестабильности к современным пассивным водородным стандартам частоты. Можно ожидать, что использование водородных стандартов частоты и времени нового поколения [2], а также более точных методов сравнения шкал времени, позволит достичь ещё более высоких точностей автоподстройки при реализации методов оптимального управления.

Список литературы

1. A Suggested GPS Format Update for GPS/GLONASS, available at: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/data/cggtts_for_mat_v2.pdf (accessed: 06.07.2021).

2. Донченко С. И., Блинов И. Ю., Норец И. Б., Смирнов Ю. Ф., Беляев А. А., Демидов Н. А., Сахаров Б. А., Воронцов В. Г. Характеристики долговременной нестабильности водородных стандартов частоты и времени нового поколения // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 35–38.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-1-35-38>

3. Rutman J., *Proc. IEEE*, Sept. 1978, vol. 66, no. 9, pp. 1048–1075. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.11080>

4. Koppang P., Leland R., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, May 1999, vol. 46, no. 3, pp. 517–522. <https://doi.org/10.1109/58.764838>

5. Mishagin K. G., Lysenko V. A., Medvedev S. Y., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, May 2020, vol. 67, no. 5, pp. 1080–1087.

<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2957650>

6. Gelb A., *Applied Optimal Estimation*, Cambridge, MSEAS, The M.I.T. Press, 1974.

7. Matsakis D., *Metrologia*, 2019, vol. 56, no. 2, pp. 025007. <http://doi.org/10.1088/1681-7575/ab0614>

References

1. A Suggested GPS Format Update for GPS/GLONASS, available at: https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/data/cggtts_for_mat_v2.pdf (accessed: 06.07.2021).

2. Donchenko S. I., Blinov I. Yu., Norets I. B., Smirnov Yu. F., Belyaev A. A., Demidov N. A., Sakharov B. A., Vorontsov V. G., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 1, pp. 34–37.

<https://doi.org/10.1007/s11018-020-01746-8>

3. Rutman J., *Proc. IEEE*, Sept. 1978, vol. 66, no. 9, pp. 1048–1075. <https://doi.org/10.1109/PROC.1978.11080>

4. Koppang P., Leland R., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, May 1999, vol. 46, no. 3, pp. 517–522. <https://doi.org/10.1109/58.764838>

5. Mishagin K. G., Lysenko V. A., Medvedev S. Y., *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, May 2020, vol. 67, no. 5, pp. 1080–1087.

<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2957650>

6. Gelb A., *Applied Optimal Estimation*, Cambridge, MSEAS, The M.I.T. Press, 1974.

7. Matsakis D., *Metrologia*, 2019, vol. 56, no. 2, pp. 025007. <http://doi.org/10.1088/1681-7575/ab0614>

Статья поступила в редакцию 14.12.2020; принята к публикации 19.04.2021.

Научная статья

УДК 006.924.4, 531.761

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-56-66>

Релятивистская синхронизация часов навигационных космических аппаратов с использованием межспутниковых измерений

Николай Николаевич Василюк¹✉, Александр Петрович Червонкин²

¹ ООО «Топкон Позишинг Системз», Москва, Россия, nik-vasilyuk@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2317-8066>

² Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия, al3296@yandex.ru

Аннотация. Задача синхронизации бортовых часов навигационных космических аппаратов рассмотрена с релятивистской точки зрения с использованием концепции «координатной одновременности». Эта концепция позволяет однозначно интерпретировать результаты синхронизации в рамках общей теории относительности. Алгоритм обработки межспутниковых измерений сформулирован в терминах приборной реализации собственного времени космического аппарата и координатного времени системы отсчёта. Указаны правила преобразования между координатной и собственной шкалами времени. Получено аналитическое выражение для периодической релятивистской поправки к оценённому значению относительного ухода часов, записанное в координатном времени наземного наблюдателя. Значение поправки превышает допустимую погрешность синхронизации и должно учитываться при обработке межспутниковых измерений. Вычислена погрешность определения релятивистской поправки, ограничивающая сверху период перезакладки эфемеридных данных на борт космических аппаратов.

Ключевые слова: межспутниковые измерения, межспутниковая лазерная связь, синхронизация часов, сверка шкал времени, релятивистские эффекты, гравитационное замедление времени

Для цитирования: Василюк Н. Н., Червонкин А. П. Релятивистская синхронизация часов навигационных космических аппаратов с помощью межспутниковых измерений // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 56–66. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-56-66>

Relativistic synchronization of onboard clocks of navigation space vehicles with the aid of intersatellite measurements

Nikolay N. Vasilyuk¹✉, Alexander P. Chervonkin²

¹ Topcon Positioning Systems, Moscow, Russia, nik-vasilyuk@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2317-8066>

² Scientific and production corporation «Systems of Precision Instruments Engineering», Moscow, Russia, al3296@yandex.ru

Abstract. The problem of the synchronization of onboard clocks of navigation satellites has considered from a relativistic point of view using the concept of “coordinate simultaneity”. This concept allows an unambiguous interpretation of the synchronization results within the framework of general relativity. The algorithm of intersatellite measurements processing has formulated in terms of a proper time of a space vehicle and the coordinate time of a reference frame. Rules of transformation between coordinate and proper time scales have indicated. An analytical expression has obtained for the periodic relativistic correction to the estimated value of the relative clock drift. This correction has expressed in terms of the coordinate time of a ground observer. The value of this correction exceeds the acceptable synchronization error and should be taken into account for the inter-satellite measurements processing. The error of the relativistic correction determination has calculated. This error provides an upper limit for the period of uploading of ephemeris data on the board of the space vehicle.

Keywords: intersatellite measurements, intersatellite laser communications, remote clock synchronization, timescales comparison, relativistic effects, gravitational time dilation

Введение. Нормальное функционирование глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС) требует регулярного обновления параметров орбитального движения навигационных космических аппаратов (КА) и уходов их бортовых часов относительно общесистемной шкалы времени. В настоящее время обновление параметров орбит и часов выполняется с помощью сети наземных контрольных станций. Контрольные и измерительные станции ГЛОНАСС размещены преимущественно на территории Российской

Федерации, поэтому измерение эфемеридно-временных параметров и их закладка на борт КА возможны не чаще одного-двух раз в сутки. Существующие средства измерений и синхронизации времени обеспечивают относительную стабильность бортовых часов КА ГЛОНАСС на уровне $1\text{--}5\cdot 10^{-13}$. Среднее квадратическое отклонение (СКО) взаимной синхронизации времени составляет 8–20 нс. Погрешность сверки шкал времени КА со шкалой системного времени, формируемой наземным центральным синхронизатором,

не превышает 10 нс [1, 2]. Таким образом, СКО случайного ухода бортовых часов КА относительно системной шкалы времени при суточном интервале коррекции не превышает

$$\sqrt{(5 \cdot 10^{-13} \cdot 24 \cdot 3600)^2 + (10 \cdot 10^{-9})^2} \approx 44 \text{ нс.}$$

Для повышения точности навигационных измерений с помощью ГЛОНАСС необходимо повысить частоту измерений параметров орбит и часов и уменьшить период их полного обновления на КА [3]. Одно из возможных решений этой задачи – установка на борт КА системы, позволяющей КА обмениваться информацией между собой и измерять параметры движения и ухода часов одного спутника относительно другого. Результаты межспутниковых измерений, выполненных между отдельными парами КА, передаются по цепочке в наземный центр обработки, где по ним вычисляются уточнённые параметры орбит и часов. Результаты обработки из наземного центра поступают на какой-либо доступный для связи КА, а затем распространяются между остальными КА с помощью той же системы. Межспутниковые измерения позволяют автономно вычислять эфемеридно-временные параметры КА внутри космического сегмента ГЛОНАСС без участия наземных центров измерения и обработки информации. Результаты межспутниковых измерений предполагается использовать для контроля технического состояния часов КА, обнаружения кратковременных нестабильностей (скачков) в измерениях бортовых часов КА длительностью 10–180 с и амплитудой 0,5–2 нс [4].

На данный момент на КА ГЛОНАСС размещены две системы для решения задач межспутниковых измерений и связи. Бортовая аппаратура межспутниковых измерений использует радиосигналы с кодовым разделением каналов и несущей частотой 2,2 ГГц [3, 5, 6]. В межспутниковой лазерной навигационно-связной системе для измерений используются пачки лазерных импульсов с длиной волны 0,83 мкм, передаваемых от одного КА к другому. Передача информации в межспутниковой лазерной навигационно-связной системе выполняется в результате модуляции положения отдельных импульсов внутри пачки [7–10]. В обеих системах используется встречный беззапросный тип измерений, при котором сигнал передаётся только в одну сторону – от передатчика к приёмнику, без обратной передачи ответного или отражённого сигнала. Каждый из взаимодействующих КА самостоятельно начинает передачу измерительного сигнала согласно собственной циклограмме и одновременно принимает встречный сигнал, независимо передаваемый другим КА. Моменты излучения и приёма сигнала регистрируются в различных шкалах времени – шкале передающего и принимающего КА соответственно. Зарегистрированные моменты времени являются первичными измеряемыми величинами в межспутниковой измерительной системе. Эти моменты времени содержат информацию о движении одного КА относительно другого. Из первичных измерений формируются разностные комбинации, которые предполагается применять для вычисления параметров орбитального движения КА ГЛОНАСС и уходов часов отдельных КА относительно шкалы времени навигационной системы [4, 11–19].

Однако во всех цитируемых работах представление об абсолютном времени взято из классической механики. В то же время процедура обработки первичных измерений описана с неявным использованием постулата о независимости скорости света от инерциальной системы отсчёта, который вводится в специальной теории относительности. Заявленная точность межспутниковой синхронизации 1–2 нс описывается величинами того же порядка, что и релятивистские эффекты, возникающие при движении КА в поле тяготения Земли. В [19] сделана ограниченная рамками специальной теории относительности попытка рассмотрения релятивистских эффектов применительно к задаче межспутниковой синхронизации. Полный анализ релятивистских эффектов требует учёта поля тяготения Земли, т. е. задача

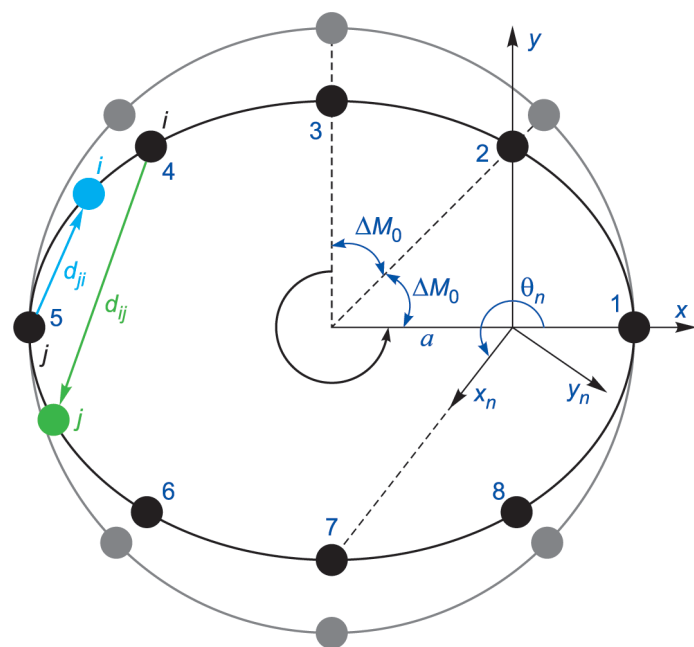


Рис. 1. Расположение КА на общей эллиптической орбите: направление движения показано круговой стрелкой в центре рисунка; 1–8 – порядковые номера восьми КА и их расположение в орбитальной плоскости в начальную эпоху (расчёта средней аномалии); «синий шар» – позиция КА_i ($i=4$) в момент приёма сигнала от КА_j ($j=5$); «зеленый шар» – позиция КА_j в момент приёма сигнала от КА_i; ΔM_0 – угловые расстояния между КА в начальную эпоху; a – большая полуось; КА_{i,j} – взаимодействующие КА; d_{ij} , d_{ji} – траектории сигналов от КА_i к КА_j и наоборот; θ_n – истинная аномалия КАН ($n=7$); x , y – оси орбитальной системы координат; x_n , y_n – оси, повернутые на угол истинной аномалии КАН

Fig. 1. Distribution of space vehicles on the common elliptic orbit. The direction of motion is shown by the round arrow in the center of figure. 1–8 – sequential numbers of eight space vehicles (SV) and their arrangement in the orbital plane at the initial epoch of the mean anomaly calculation; ΔM_0 – equal angular displacements between space vehicles at the initial epoch; a – major semiaxis; $i=4$, $j=5$ – connecting space vehicles; “blue ball” – position of the SV_i at the instant of reception of the signal from SV_j; “green ball” – position of the SV_j at the instant of reception of the signal from SV_i; d_{ij} – trajectory of the signal from SV_i to SV_j; d_{ji} – trajectory of the signal from SV_j to SV_i; θ_n – true anomaly for SV_n ($n=7$); x , y – axes of the orbital coordinate system; x_n , y_n – axes, have turned on the true anomaly angle of SV_n

синхронизации должна рассматриваться в рамках общей теории относительности.

Постановка задачи. Рассмотрим релятивистскую задачу межспутниковой синхронизации как задачу определения ухода бортовых часов одного КА относительно другого. Взаимные уходы часов между парами КА позволяют синхронизировать часы каждого отдельного КА с часами некоторого опорного КА вдоль замкнутой цепочки межспутниковых взаимодействий [4]. Рациональный выбор опорного КА (например, имевшего недавний сеанс связи с наземным центром управления) позволяет своевременно корректировать дрейфы и обнаруживать сбои бортовых часов отдельных КА.

Для выделения основных релятивистских эффектов и получения их численных значений в данной работе используется предельно упрощённая модель измерений и движения КА. Предполагается, что восемь КА движутся в одной орбитальной плоскости по общей эллиптической орбите (рис. 1). Параметры орбитальной конфигурации представлены в табл. 1.

Геометрия околоземного пространства в данной работе описывается метрикой теории относительности Эйнштейна в гармонической калибровке, рекомендуемый вид которой определён в резолюции В1.3 24-й Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) 2000 г., взятой с точностью до первых постньютоновских поправок для сферической Земли радиусом R_E (см. табл. 1). Радиус R_E соответствует среднему радиусу Земли для земного эллипсоида ПЗ-90.11. Несферичность Земли, а также гравитационное притяжение Луны и Солнца в метрике не учитываются. Учёт этих факторов необходим при постановке задачи релятивистской синхронизации с точностью лучше 1 нс. Также в данной работе не принимаются во внимание

всевозможные негравитационные факторы, влияющие на движение КА и не учитываются шумы передающей и принимающей аппаратуры [17, 18]. В качестве эксцентриситета взят максимальный эксцентриситет из 24 орбит, представленных в (Эфемериды ИАЦ; [сайт]. URL: <https://www.glonass-iac.ru>) на дату 22.10.2020 г.

Уход часов КА определяется относительно национальной шкалы координированного времени России UTC(SU), которая является опорной шкалой времени системы ГЛОНАСС и национальной реализацией шкалы всемирного координированного времени UTC. Шкала времени UTC является специфической реализацией международной шкалы земного времени TT (Time Terrestrial). Время TT измеряют часы, расположенные на уровне моря и неподвижные относительно вращающейся Земли.

Позиция и скорость КА (эфемериды КА) задаются относительно геоцентрической системы отсчёта GCRS (Geocentric Celestial Reference System), определённой в резолюции В1.3 24-й Генеральной ассамблеи МАС и рекомендованной для описания движения космических объектов в околоземном пространстве. Время в GCRS задаётся относительно шкалы времени TCG (Temps Coordonnée Géocentrique), определённой в рекомендации III резолюции А.4 22-й Генеральной ассамблеи МАС 1991 г. Физически это определение означает, что время TCG измеряется часами, размещёнными в центре масс Земли и находящимися под действием гравитационных полей всех тел Солнечной системы, кроме поля Земли. В принятом здесь приближении время TCG можно рассматривать как время, измеренное неподвижными относительно GCRS и бесконечно удалёнными от Земли часами.

Полученные результаты верны для любой другой геоцентрической системы отсчёта, в которой метрика околоземного пространства-времени совпадает с метрикой GCRS с точностью до членов порядка c^{-2} включительно (c – скорость света в вакууме). Способ определения такой системы отсчёта в рамках данной работы не имеет принципиального значения, так как решается задача синхронизации бортовых часов КА, а не определения их пространственных координат.

В работе приняты следующие обозначения. Моменты времени излучения и приёма сигналов, измеренные бортовыми часами КА (моменты собственного времени), обозначены соответственно τ , ρ , моменты возникновения этих же событий в шкале времени системы отсчёта, в которой рассматривается задача синхронизации, – соответственно t , q .

Первичная обработка встречных измерений. Процедура межспутниковых измерений представляет собой независимый обмен электромагнитными сигналами между двумя КА. Если показания бортовых часов КА достигают заранее заданного программного значения $\tau_{пр}$, то на КА включается передатчик для излучения электромагнитного сигнала в направлении другого КА. Численное значение $\tau_{пр}$ одинаково для обоих КА. Моменты времени фактического излучения сигнала фиксируются на каждом КА по его собственным бортовым часам. Момент излучения от КА i к КА j , измеренный часами КА i , обозначим $\tilde{\tau}_{ij}$, $i, j=1, \dots, 8$ (в обратную сторону – $\tilde{\tau}_{ji}$), причём $\tilde{\tau}_{ij} \neq \tilde{\tau}_{ji} \neq \tau_{пр}$. Различия между моментами фактического излучения сигналов обусловлены разными задержками в передающей аппаратуре

Таблица 1

Параметры орбитальной конфигурации

Параметр	Значение
Средний радиус Земли R_E , км	6371
Гравитационная постоянная GM , m^3/c^2	$398600,4418 \cdot 10^9$
Нормальный потенциал на поверхности общеземного эллипсоида W_0 , m^2/c^2	62636861,4
Номинальный радиус орбиты a_0 , км	25471
Эксцентриситет e	0,00274
Средняя скорость КА v , м/с	3955,905
Период обращения КА T_{SV} , ч	11,2377
Максимальная длина трассы вдогонку $ d_{ij} _{\max}$, м	19544288,606
Минимальная длина трассы навстречу $ d_{ji} _{\min}$, м	19445114,475
Разность длин трасс максимальная $ d_{ij} - d_{ji} _{\max}$, м	477,525
минимальная $ d_{ij} - d_{ji} _{\min}$, м	473,119
Разностная поправка: максимальная $ \delta t_{ij}^D _{\max}$, нс	796,43
минимальная $ \delta t_{ij}^D _{\min}$, нс	789,08

различных КА. Сигнал, излучённый КА_i, принимается на КА_j в момент времени $\tilde{t}_{ij}$, измеренный по часам КА_j. Измерения моментов времени, выполненные по бортовым часам, содержат уходы часов относительно шкалы времени навигационной системы:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{t}_{ij} &= t_{ij} + \delta_i, \quad \tilde{\rho}_{ij} = q_{ij} + \delta_j, \\ \tilde{t}_{ji} &= t_{ji} + \delta_j, \quad \tilde{\rho}_{ji} = q_{ji} + \delta_i, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где t_{ij}, t_{ji} – моменты излучения; q_{ij}, q_{ji} – моменты приёма в системной шкале времени; δ_i, δ_j – уходы бортовых часов КА_i, КА_j относительно системной шкалы времени.

Уход часов КА_j относительно КА_i задаётся величиной $\delta_{ij} = \delta_j - \delta_i$, такой что $\tilde{t}_{jX} = \tilde{t}_{iX} + \delta_{ij}$, где $\tilde{t}_{iX}, \tilde{t}_{jX}$ – моменты возникновения одного и того же события X по часам соответственно КА_i, КА_j.

Момент приёма q_{nm} ($n, m = i, j$) находится из «светового» уравнения

$$q_{nm} = t_{nm} + |\mathbf{r}_m(q_{nm}) - \mathbf{r}_n(t_{nm})|/c = t_{nm} + d_{nm}/c,$$

где $\mathbf{r}_n(t)$ – координаты КА_n относительно GCRS в момент времени t ; $d_{nm} = |\mathbf{r}_m(q_{nm}) - \mathbf{r}_n(t_{nm})|$ – длина трассы распространения сигнала от КА_n к КА_m.

После завершения обмена измерительными сигналами КА передают друг другу по обычному каналу связи значения измеренных моментов времени $\tilde{\rho}_{ij}, \tilde{\rho}_{ji}, \tilde{t}_{ij}, \tilde{t}_{ji}$ (первичные измерения) из которых формируется двойная разность [6–16]:

$$\Delta_{ij} = [(\tilde{\rho}_{ij} - \tilde{t}_{ij}) - (\tilde{\rho}_{ji} - \tilde{t}_{ji})]/2, \quad (2)$$

которая интерпретируется как оценка ухода часов КА_j относительно КА_i. Подставим выражения из системы (1) в двойную разность (2):

$$\Delta_{ij} = \delta_{ij} + (\Delta t_{ij} - \Delta t_{ji})/2 = \delta_{ij} + \delta t_{ij}^D; \quad (3)$$

$$\Delta t_{ij} = q_{ij} - t_{ij} = d_{ij}/c;$$

$$\Delta t_{ji} = q_{ji} - t_{ji} = d_{ji}/c,$$

где $\Delta t_{ij}, \Delta t_{ji}$ – длительности распространения сигналов в системной шкале времени; d_{ij}, d_{ji} – длины трасс распространения сигналов от КА_i до КА_j и обратно.

Оценка (3) относительного ухода часов δ_{ij} содержит поправку $\delta t_{ij}^D = (d_{ij} - d_{ji})/2c$, возникающую из-за разности расстояний, которые проходят сигналы, распространяющиеся навстречу d_{ij} и вдогонку d_{ji} между соседними КА (см. рис. 1). Эта поправка изменяется с периодом T_{SV} обращения КА в границах, приведённых в табл. 1, и должна учитываться при обработке первичных межспутниковых измерений.

Координатная синхронизация часов и геометрия пространства-времени. Согласно ГОСТ 8.567-99 «Измерение времени и частоты. Термины и определения» под синхронизацией часов понимается приведение часов в такое состояние, при котором их показания в момент возникновения любого события совпадают. В классической механике понятие синхронизации имеет однозначное толкование в силу абсолютности

одновременности, которая следует из абсолютности времени. В специальной теории относительности одновременность относительна и понятие синхронизации однозначно формулируется только для часов, неподвижных относительно инерциальной системы отсчёта. Часы считаются синхронизированными, если их показания настроены согласно процедуре синхронизации Эйнштейна, которая вводится по определению. Формальное применение этой процедуры в условиях общей теории относительности вызывает трудности и не всегда приводит к однозначному результату [20–22].

В общей теории относительности используются два связанных типа времени – собственное и координатное. В общем случае координатное время не является физической величиной, не измеряется никакими часами и имеет чисто геометрический смысл – одна из координат в четырёхмерном пространстве-времени. Момент координатного времени возникновения события может быть получен только в результате вычислительной обработки результатов наблюдений. Измеряемым временем в общей теории относительности является собственное время – время, измеряемое часами, скреплёнными с наблюдателем и расположенными с ним в одной точке пространства. Подбором системы координат можно выбрать часы, собственное время которых будет совпадать с координатным временем, но (в общем случае) только в месте расположения этих часов, а не во всём пространстве.

В математическом смысле четырёхмерное пространство-время является четырёхмерным псевдоевклидовым пространством, в котором возможны положительные, отрицательные и нулевые «расстояния» между различными точками. Далее это пространство будем называть континуумом, чтобы отличать его от обычного трёхмерного пространства (далее – пространство). Положение события в континууме задаётся координатами $\{x^\alpha\} \equiv \{x^0, x^1, x^2, x^3\}$, $\alpha = 0..3$, из которых координаты x^1, x^2, x^3 являются пространственными, а $x^0 \equiv ct$, где t – координатное время. Для того чтобы выйти из затруднения с синхронизацией часов в общей теории относительности, в прикладной астрономии введено понятие «координатной синхронизации» [21–23]. Координатная синхронизация основана на понятии координатной одновременности – два события «1» и «2» с координатами $\{x_1^\alpha\}$ и $\{x_2^\alpha\}$ считаются одновременными, если равны моменты координатного времени возникновения этих событий $t_1 = t_2$. Таким образом, пространственно-разнесённые часы считаются синхронизированными, если совпадают значения моментов координатного времени возникновения любого события, рассчитанные из значений моментов собственного времени возникновения этого события. Координатная одновременность относительна, поэтому часы, синхронизированные в одной системе отсчёта, не будут синхронизированы в другой.

Геометрия континуума описывается метрическим тензором (метрикой) $g_{\alpha\beta}$, $\alpha, \beta = 0..3$, с помощью которого вычисляются расстояния между бесконечно близкими точками. Шестнадцать компонент тензора $g_{\alpha\beta}$ в некоторой (исходной) системе координат получаются в результате решения уравнения Эйнштейна для гравитационного поля. Если часы переместились из точки $\{x^\alpha\}$ в бесконечно близкую точку

$\{x^a + dx^a\}$, то квадрат интервала («расстояния») между этими точками (используются тензорные обозначения для суммирования по одинаковым верхнему и нижнему индексам):

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta = g_{00} c^2 dt^2 + 2cg_{0k} dt dx^k + g_{km} dx^k dx^m, \quad k, m = 1 \dots 3.$$

С часами связана их собственная система координат, относительно которой часы неподвижны. В бесконечно малой окрестности часов между исходной и собственной системами координат существует взаимно-однозначное преобразование, переводящее тензор общего вида $g_{\alpha\beta}$ в диагональный тензор $\eta_{\alpha\beta} = \text{diag}\{-1, 1, 1, 1\}$, точку $\{x^a\}$ в точку $\{0, 0, 0, 0\}$, а точку $\{x^a + dx^a\}$ – в точку $\{cdt, 0, 0, 0\}$, где dt – промежуток собственного времени, измеренный часами за время перемещения. Квадрат интервала инвариантен относительно локальных преобразований координат:

$$ds^2 = g_{\alpha\beta} dx^\alpha dx^\beta = \eta_{00} c^2 d\tau^2 = -c^2 d\tau^2, \quad d\tau = \sqrt{-g_{00} - 2g_{0k} \frac{v^k}{c} - g_{km} \frac{v^k}{c} \frac{v^m}{c}} dt, \quad (4)$$

где $v^k = dx^k/dt$, $k = 1 \dots 3$ – координатная скорость часов.

Пусть в некоторый момент координатного времени t_0 значение собственного времени на часах равно τ_0 . Собственное время τ_1 в момент координатного времени t_1 получается интегрированием (4):

$$\tau_1 = \tau_0 + \int_{t_0}^{t_1} \sqrt{-g_{00} - 2g_{0k} \frac{v^k}{c} - g_{km} \frac{v^k}{c} \frac{v^m}{c}} dt. \quad (5)$$

Значение координатного времени t_1 восстанавливается из измеренного значения собственного времени τ_1 как решение уравнения (5) относительно верхнего предела интегрирования. Для решения этого уравнения необходимо знать траекторию движения часов и метрику континуума.

Электромагнитный сигнал – наиболее быстрое и удобное средство оповещения движущихся часов о возникновении синхронизирующего события. Этот сигнал распространяется хоть и с предельной, но конечной скоростью, поэтому в задаче синхронизации необходимо учитывать время распространения сигнала от точки возникновения события до часов. Интервал между двумя событиями, состоящими в перемещении сигнала из точки $\{x^a\}$ в $\{x^a + dx^a\}$ (или обратно), всегда равен нулю:

$$ds^2 = g_{00} c^2 dt^2 + 2cg_{0k} dt dx^k + g_{km} dx^k dx^m = 0.$$

Записанное квадратное уравнение относительно dt имеет два решения

$$dt = \frac{1}{c} \frac{g_{0k}}{-g_{00}} dx^k \pm \frac{1}{c\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{km} + \frac{g_{0k}g_{0m}}{-g_{00}}\right) dx^k dx^m}. \quad (6)$$

Знак «+» соответствует времени перемещения сигнала из точки $\{x^a\}$ в $\{x^a + dx^a\}$, знак «–» – в обратном направлении. Время распространения сигнала между разнесёнными точками

получается интегрированием первого решения (6) вдоль траектории сигнала в пространстве:

$$\Delta t = \int_{r_1}^{r_2} \left[\frac{1}{c} \frac{g_{0k}}{-g_{00}} dx^k + \frac{1}{c\sqrt{-g_{00}}} \sqrt{\left(g_{km} + \frac{g_{0k}g_{0m}}{-g_{00}}\right) dx^k dx^m} \right], \quad (7)$$

где r_1, r_2 – координаты начальной и конечной точек.

Электромагнитный сигнал распространяется в пространстве вдоль линии с наименьшим временем распространения, которая в континууме имеет нулевую длину. Такая линия называется изотропной геодезической. Таким образом, для расчёта времени распространения сигнала между двумя точками, нужно построить изотропную геодезическую между этими точками, а затем проинтегрировать (7) вдоль неё.

Преобразования шкал координатного времени. Метрический тензор $g_{\alpha\beta}$ околоземного континуума в GCRS (с координатным временем TCG) в рамках нашего приближения сводится к виду [24]:

$$\left. \begin{aligned} g_{00} &= -1 + 2U/c^2, \quad g_{0k} = 0, \\ g_{km} &= (1 + 2U/c^2) \delta_{km}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $U = GM/|r|$ – потенциал гравитационного поля сферической Земли в точке с геоцентрическим радиус-вектором r ; GM – гравитационная постоянная Земли (см. табл. 1); δ_{km} – символ Кронекера.

Промежутки координатных времён Δt_∞ (TCG) и Δt (UTC) связаны линейным отношением

$$\Delta t = \lambda_\infty \Delta t_\infty,$$

где $\lambda_\infty = \sqrt{1 - 2W_0/c^2} \approx 1 - W_0/c^2 = 1 - L_G$; W_0 – гравитационный потенциал на поверхности геоида (см. табл. 1), включающий в себя вращение Земли; $L_G = W_0/c^2$ – постоянная преобразования временных шкал (табл. 2).

При замене шкалы времени TCG на UTC координатные скорости КА (заданные относительно GCRS) преобразуются следующим образом:

$$v^k = \frac{dx^k}{dt} = \frac{dx^k}{\lambda_\infty dt_\infty} = \frac{v_\infty^k}{\lambda_\infty},$$

где $v^k = dx^k/dt$, $v_\infty^k = dx^k/dt_\infty$ – координатные скорости в шкалах времени UTC и TCG соответственно.

Подставим коэффициенты тензора (8) в (5):

$$\hat{\tau}_1 = \hat{\tau}_0 + \int_{t_{\infty 0}}^{t_{\infty 1}} \sqrt{1 - \frac{2U}{c^2} - \frac{v_\infty^2}{c^2} - \frac{2Uv_\infty^2}{c^4}} dt_\infty, \quad (9)$$

где $\hat{\tau}_0, \hat{\tau}_1$ – моменты собственного времени КА, соответствующие моментам координатного времени $t_{\infty 0}, t_{\infty 1}$;

$$v_\infty = \delta_{km} v_\infty^k v_\infty^m = \sqrt{(v_\infty^1)^2 + (v_\infty^2)^2 + (v_\infty^3)^2}.$$

Таблица 2

Для номинальных значений параметров орбиты ГЛОНАСС (см. табл. 1):

$$(2U+v^2)/c^2 \approx 5,2236 \cdot 10^{-10}, \quad 2Uv^2/c^4 \approx 6,0636 \cdot 10^{-20}.$$

Подынтегральное выражение в (9) разлагается в ряд относительно слагаемого порядка c^{-2} , а слагаемые порядка c^{-4} и выше здесь и далее отбрасываются в силу малости:

$$\hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_0 \approx \int_{t_{\infty 0}}^{t_{\infty 1}} \left[1 - \frac{U + 0,5v_{\infty}^2}{c^2} \right] dt_{\infty} + \delta k^I (t_{\infty 1} - t_{\infty 0}), \quad (10)$$

где $\delta k^I \approx 0,045 \cdot 10^{-15}$ – погрешность приближения подынтегрального выражения.

Эта погрешность даёт дрейф оценки собственного времени КА 4 пс/сут. и при регулярных коррекциях ей можно пренебречь. Интегрирование (10) вдоль эллиптической орбиты выполнено в [24]:

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_0 \approx & \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\mu_E}{a} \right) (t_{\infty 1} - t_{\infty 0}) - \\ & - \frac{2}{c^2} [\mathbf{r}_{\infty}(t_{\infty 1}) \cdot \mathbf{v}_{\infty}(t_{\infty 1}) - \mathbf{r}_{\infty}(t_{\infty 0}) \cdot \mathbf{v}_{\infty}(t_{\infty 0})], \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mu_E = 2GM/c^2$ – гравитационный радиус Земли (см. табл. 2); a – большая полуось орбиты; $\mathbf{r}_{\infty}(t_{\infty})$, $\mathbf{v}_{\infty}(t_{\infty})$ – радиус-вектор и вектор скорости КА для координатного времени t_{∞} .

Для применения (11) к КА ГЛОНАСС необходимо преобразовать это выражение к координатному времени UTC. Для этого достаточно выполнить подстановки

$$\left. \begin{aligned} t_{\infty} &= t_{\infty 0} + (t - t_0)/\lambda_{\infty}, \\ \mathbf{r}_{\infty}(t_{\infty}) &= \mathbf{r}(t), \\ \mathbf{v}_{\infty}(t_{\infty}) &= \mathbf{v}(t)/\lambda_{\infty}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где $\mathbf{r}(t) = [x^1(t) \ x^2(t) \ x^3(t)]^T$, $\mathbf{v}(t) = [v^1(t) \ v^2(t) \ v^3(t)]^T$ – эфемериды КА относительно GCRS для координатного времени t ; $t_{\infty 0}$, t_0 – условные моменты начала отсчёта времени в шкалах TCG и UTC соответственно. В значении t_0 учитывается полное число високосных секунд на момент выполнения подстановки. После подстановки выражение (11) переписывается в виде

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_0 \approx & \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\mu_E}{a} + L_G \right) (t_1 - t_0) - \\ & - \frac{2}{c^2} [\mathbf{r}(t_1) \cdot \mathbf{v}(t_1) - \mathbf{r}(t_0) \cdot \mathbf{v}(t_0)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Частота бортового стандарта 5 МГц КА ГЛОНАСС, задающего темп хода бортовых часов, смещена на $\Delta f = k_G \cdot 5 \cdot 10^6 = -2,18 \cdot 10^{-3}$ Гц, где $k_G = 3\mu_E/(4a_0) - L_G$ (см. табл. 2). За счёт этого смещения промежуток «приборного» времени $\Delta\tau$ на КА с точностью до периодического слагаемого уравнивается с промежуток координатного времени Δt

Релятивистские постоянные и поправки

Параметр	Значение
Гравитационный радиус Земли μ_E , мм	8,87
Константа преобразования временных шкал L_G	$6,969290134 \cdot 10^{-10}$
Аппаратная коррекция темпа хода часов КА k_E	$-4,35748042 \cdot 10^{-10}$
Гравитационная задержка:	
максимальная вдогонку $\delta t_{ij\max}^G$, пс	23,994
минимальная навстречу $\delta t_{ij\min}^G$, пс	23,725
Максимальная абсолютная поправка:	
$ \delta t_{ij}^I _{\max}$, фс	0,6
$ \delta t_{ij}^{II} _{\max}$, фс	0,33
$ \delta t_{ij}^{III} _{\max}$, нс	4,7

на геоиде: $\Delta\tau = (1 + k_G)\Delta\hat{\tau}$, где $\Delta\hat{\tau} = \hat{\tau}_1 - \hat{\tau}_0$ – промежуток собственного времени КА в (13). Поскольку все циклограммы и измерения на борту КА выполняются относительно «приборного» времени, оно часто рассматривается как единственное собственное время КА. Здесь время τ будем называть «приборным», чтобы подчеркнуть его отличие от «истинного» собственного времени КА, описанного в общей теории относительности. Умножим обе части (13) на $1 + k_G$ и получим уравнение связи приборного времени КА с координатным временем системы ГЛОНАСС:

$$\tau_1 - \tau_0 \approx t_1 - t_0 + \frac{3}{4} \frac{\mu_E}{a_0^2} (a - a_0) - \frac{2}{c^2} [\mathbf{r}(t_1) \cdot \mathbf{v}(t_1) - \mathbf{r}(t_0) \cdot \mathbf{v}(t_0)]. \quad (14)$$

Координатная синхронизация по встречным измерениям. Пусть в некоторый момент координатного времени t_{Sn} на КА $_n$ выставлено начальное значение приборного времени τ_{Sn} , $n = i, j$. КА $_i$ излучает в направлении КА $_j$ электромагнитный сигнал в момент времени $\tilde{\tau}_{ij} = \tau_{ij} + \delta_i$, измеренный по его бортовым часам. Этот сигнал принимается на борту КА $_j$ в измеренный момент времени $\tilde{\rho}_{ij} = \rho_{ij} + \delta_j$. Здесь τ_{ij} , ρ_{ij} – моменты приборного времени излучения на КА $_i$ и приёма на КА $_j$; δ_n – уход бортовых часов КА $_n$ от шкалы приборного времени. При «классическом» рассмотрении задачи синхронизации символ δ_n обозначал уход часов относительно шкалы времени системы.

Обозначим моменты координатного времени излучения и приёма сигнала t_{ij} и q_{ij} и запишем (14) для измеренных моментов излучения и приёма $\tilde{\tau}_{ij}$ и $\tilde{\rho}_{ij}$:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\tau}_{ij} &= \delta_i + t_{ij} + [\tau_{Si} - t_{Si}] + \frac{3\mu_E}{4a_0^2} (a_i - a_0) - \frac{2}{c^2} [h_i(t_{ij}) - h_i(t_{Si})], \\ \tilde{\rho}_{ij} &= \delta_j + q_{ij} + [\tau_{Sj} - t_{Sj}] + \frac{3\mu_E}{4a_0^2} (a_j - a_0) - \frac{2}{c^2} [h_j(q_{ij}) - h_j(t_{Sj})], \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где a_n – большая полуось орбиты КА $_n$, $h_n(t) = \mathbf{r}_n(t) \cdot \mathbf{v}_n(t)$.

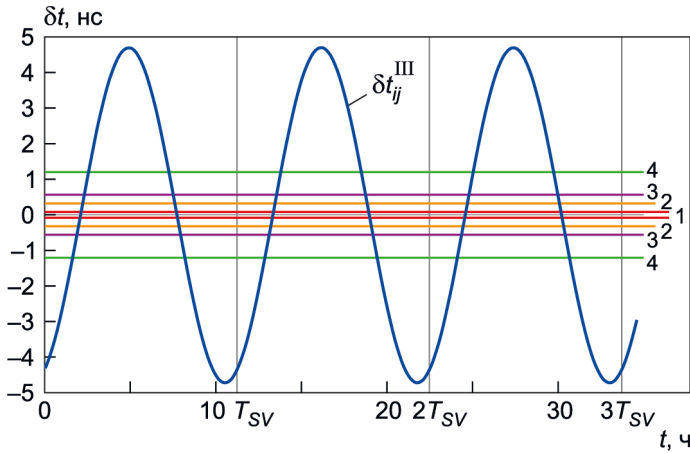


Рис. 2. Релятивистская поправка и суммарные погрешности исправления двойной разности межспутниковых измерений между КА1 и КА2 (см. рис. 1); t – текущее время UTC; δt – временной интервал UTC; $\delta t_{ij}^{\text{III}}$ – релятивистская поправка; 1, 2, 3, 4 – границы $\pm\sigma_{\Sigma ij}$ для окончательных, предварительных и оперативных эфемерид СВОЭВП и для широковегательных эфемерид ГЛОНАСС-М (см. табл. 3)

Fig. 2. Relativistic correction and accumulated errors of the correction of the double difference of the intersatellite measurements between of the SV1 and SV2 on the fig. 1; t – current time UTC, [hour]; δt – time interval UTC [ns]; $\delta t_{ij}^{\text{III}}$ – relativistic correction; 1, 2, 3, 4 – $\pm\sigma_{\Sigma ij}$ limits for final, rapid and ultra-rapid products of the System of High-Precision Determination of Ephemeris and Time Corrections (SHPDETС) and for broadcast ephemeris of a GLONASS-M (Table 3)

Выражения (15) упрощаются, если момент t_{Sn} начальной выставки бортовых часов привязывать к моменту прохождения апогея или перигея $КА_n$ (когда $h_n(t_{Sn})=0$), а начальный момент приборного времени выставять как $\tau_{Sn}=t_{Sn}$. Разность между упрощёнными выражениями (15)

$$\tilde{\rho}_{ij} - \tilde{\tau}_{ij} = \delta_{ij} + [q_{ij} - t_{ij}] + \delta t_{ij}^E - \frac{2}{c^2} [h_j(q_{ij}) - h_i(t_{ij})], \quad (16)$$

где $\delta t_{ij}^E = \frac{3\mu_E}{4a_0^2} (a_j - a_i)$ – релятивистская поправка на разность больших полуосей орбит взаимодействующих КА.

Подставим релятивистскую модель встречных измерений (16) в двойную разность (2):

$$\Delta_{ij} = \delta_{ij} + \delta t_{ij}^E + \frac{\Delta t_{ij} - \Delta t_{ji}}{2} - \frac{[h_j(q_{ij}) - h_i(t_{ij})] - [h_i(q_{ji}) - h_j(t_{ji})]}{c^2}. \quad (17)$$

На круговой орбите $h_n(t)=0$, $\delta t_{ij}^E=0$ и (17) по форме совпадает с (3).

Длительность распространения сигнала по шкале времени TCG получается интегрированием (7) в околоземном пространстве с метрикой (8) [25]:

$$\Delta t_{\infty ij} = \frac{d_{\infty ij}}{c} + \delta t_{\infty ij}^G,$$

$$\delta t_{\infty ij}^G = \frac{\mu_E}{c} \ln \frac{r_{\infty i}(t_{\infty ij}) + r_{\infty j}(q_{\infty ij}) + d_{\infty ij}}{r_{\infty i}(t_{\infty ij}) + r_{\infty j}(q_{\infty ij}) - d_{\infty ij}}, \quad (18)$$

где $d_{\infty ij} = |r_{\infty j}(q_{\infty ij}) - r_{\infty i}(t_{\infty ij})|$; $\delta t_{\infty ij}^G$ – релятивистская поправка на гравитационную задержку распространения сигнала, $r_{\infty n}(t_{\infty}) = |r_{\infty n}(t_{\infty})|$. Для общей теории относительности Эйнштейна значения параметров в обозначениях [25] равны $m = \mu_E/2$, $\alpha = 0$, $\gamma = 1$. Длительность Δt_{ij} по шкале UTC получается из $\Delta t_{\infty ij}$ после подстановки (12) в (18):

$$\Delta t_{ij} = \frac{\lambda_{\infty} d_{ij}}{c} + \delta t_{ij}^G, \quad (19)$$

$$\delta t_{ij}^G = \frac{\lambda_{\infty} \mu_E}{c} \ln \frac{r_i(t_{ij}) + r_j(q_{ij}) + d_{ij}}{r_i(t_{ij}) + r_j(q_{ij}) - d_{ij}}.$$

Подставим (18) в (16):

$$\Delta_{ij} = \delta_{ij} + \delta t_{ij}^D + \delta t_{ij}^E + \delta t_{ij}^I + \delta t_{ij}^{\text{II}} + \delta t_{ij}^{\text{III}},$$

$$\delta t_{ij}^I = -L_G \delta t_{ij}^D;$$

$$\delta t_{ij}^{\text{II}} = (\delta t_{ij}^G - \delta t_{ji}^G)/2;$$

$$\delta t_{ij}^{\text{III}} = -([h_j(q_{ij}) - h_i(t_{ij})] - [h_i(q_{ji}) - h_j(t_{ji})])/c^2,$$

где δt_{ij}^I , $\delta t_{ij}^{\text{II}}$, $\delta t_{ij}^{\text{III}}$ – релятивистские поправки с периодом повторения T_{sv} .

Поправка $\delta t_{ij}^E = 0,1$ нс соответствует разности больших полуосей орбит $КА_i$ и $КА_j$ $|a_i - a_j| = 9752$ км, которая на практике не встречается. Поэтому поправкой δt_{ij}^E при практических расчётах можно пренебречь. Максимальные абсолютные значения поправок δt_{ij}^I , $\delta t_{ij}^{\text{II}}$ приведены в табл. 2 и ими тоже можно пренебречь. График поправки $\delta t_{ij}^{\text{III}}$ показан на рис. 2. Это наиболее значимая релятивистская поправка, максимальное абсолютное значение которой равно 4,7 нс (для эксцентриситета $e = 0,00274$) превышает требуемую точность определения относительного ухода часов. Эта поправка должна учитываться при обработке межспутниковых измерений на эллиптических орбитах. Для чисто круговых орбит эта поправка равна нулю.

Окончательное выражение для релятивистской двойной разности межспутниковых измерений по форме совпадает с (3) с точностью до релятивистской поправки

$$\Delta_{ij} = \delta_{ij} + \delta t_{ij}^D + \delta t_{ij}^{\text{III}}. \quad (20)$$

В момент выполнения межспутниковых измерений на борту КА доступно только его приборное время. Согласно (15), значения моментов приборного времени КА отличаются от моментов координатного времени UTC на сумму значений ухода часов и релятивистской поправки. При наихудшем значении нестабильности бортовой шкалы времени СКО этого отличия не превышает 50 нс (при суточной коррекции). Поэтому для расчёта поправок в (20) в реальном времени в выражения

Таблица 3

СКО доступных эфемерид

Тип эфемерид	СКО позиции, м			$\sigma_{\Sigma ij}$, нс
	радиальной	трансверсальной	бинормальной	
Окончательные	0,1	0,5	0,2	0,1
Предварительные	0,4	3,0	1,5	0,3
Оперативные	0,7	5,0	2,0	0,6
Широковещательные	1,5	7,0	7,0	1,2

для $\delta t_{ij}^D, \delta t_{ij}^{III}$ можно подставить значения эфемерид, вычисленные на моменты приборного времени излучения и приёма сигналов:

$$\left. \begin{aligned} \delta t_{ij}^D &= \frac{|\mathbf{r}_j(\tilde{\rho}_{ij}) - \mathbf{r}_i(\tilde{\tau}_{ij})| - |\mathbf{r}_i(\tilde{\rho}_{ji}) - \mathbf{r}_j(\tilde{\tau}_{ji})|}{2c}, \\ \delta t_{ij}^{III} &= -\frac{h_j(\tilde{\rho}_{ij}) - h_i(\tilde{\tau}_{ij}) - h_i(\tilde{\rho}_{ji}) + h_j(\tilde{\tau}_{ji})}{c^2} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

Погрешности расчёта поправок. Оценим погрешности расчёта разностной δt_{ij}^D и релятивистской δt_{ij}^{III} поправок, обусловленные только погрешностями задания эфемерид КА и уходами часов. Считается, что все КА движутся в одной плоскости по общей эллиптической орбите (см. рис. 1). Погрешности эфемерид и часов для каждого КА имеют одинаковые распределения, независимы и постоянны в течение измерительного сеанса. Погрешности эфемерид приведены в табл. 3, где указаны СКО окончательных (final), предварительных (rapid) и оперативных (ultra-rapid) эфемерид системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП) (Характеристики СВОЭВП: [сайт]. URL: <http://glonass-svoevp.ru>). Там же приведены при суточном прогнозе СКО широковещательных (broadcast) эфемерид, передаваемых в навигационных кадрах КА ГЛОНАСС-М [2]. СКО погрешностей отдельных компонент скорости одинаковы для всех типов эфемерид и составляют 0,2; 0,03; 0,03 см/с соответственно для радиальной, трансверсальной и бинормальной скоростей.

Дисперсии отдельных погрешностей расчёта поправок вычисляются как математические ожидания квадратов их вариаций $\delta\{\delta t_{ij}^D\}$ и $\delta\{\delta t_{ij}^{III}\}$ в окрестностях расчётных значений

$$\delta\{\delta t_{ij}^D\} = \frac{\delta\{\tilde{d}_{ij}\} - \delta\{\tilde{d}_{ji}\}}{2c},$$

$$\delta\{\delta t_{ij}^{III}\} = -c^{-2} \left[\delta\{h_j(\tilde{\rho}_{ij})\} - \delta\{h_i(\tilde{\tau}_{ij})\} - \delta\{h_i(\tilde{\rho}_{ji})\} + \delta\{h_j(\tilde{\tau}_{ji})\} \right],$$

где $\tilde{d}_{nm} = |\mathbf{r}_m(\tilde{\rho}_{nm}) - \mathbf{r}_n(\tilde{\tau}_{nm})| = |\Delta \tilde{\mathbf{r}}_{nm}|$, $n, m = i, j$. Вариации отдельных слагаемых:

$$\delta\{\tilde{d}_{nm}\} = \tilde{\mathbf{u}}_{nm}^T [S_m(\tilde{\rho}_{nm}) \delta \hat{\mathbf{r}}_m - S_n(\tilde{\tau}_{nm}) \delta \hat{\mathbf{r}}_n + \mathbf{v}_m(\tilde{\rho}_{nm}) \delta m - \mathbf{v}_n(\tilde{\tau}_{nm}) \delta n],$$

$$\delta\{h_n(\tilde{\tau})\} = \mathbf{v}_n^T(\tilde{\tau}) S_n(\tilde{\tau}) \delta \hat{\mathbf{r}}_n + \mathbf{r}_n^T(\tilde{\tau}) S_n(\tilde{\tau}) \delta \hat{\mathbf{v}}_n + [\mathbf{v}_n^2(\tilde{\tau}) + \mathbf{r}_n^T(\tilde{\tau}) \mathbf{a}_n(\tilde{\tau})] \delta n,$$

где $\mathbf{a}_n(\tilde{\tau}) = \dot{\mathbf{v}}_n(\tilde{\tau})$ – ускорение КА n ; $\tilde{\tau} = \tilde{\tau}_{ij}, \tilde{\tau}_{ji}, \tilde{\rho}_{ij}, \tilde{\rho}_{ji}$ – измеренный момент времени; $\delta \hat{\mathbf{r}}_n, \delta \hat{\mathbf{v}}_n$ – погрешности радиальной (ось x_n), трансверсальной (ось y_n) и бинормальной (ось z_n) компонент позиции и скорости КА n ; $\tilde{\mathbf{u}}_{nm} = \Delta \tilde{\mathbf{r}}_{nm} / |\Delta \tilde{\mathbf{r}}_{nm}|$ – единичный вектор из передающего КА n в принимающий КА m ;

$S_n(\tilde{\tau})$ – матрица преобразования из «повёрнутой» системы координат $\{x_n, y_n, z_n\}$ в орбитальную $\{x, y, z\}$ (см. рис. 1):

$$S_n(\tilde{\tau}) = \begin{bmatrix} \cos \theta_n(\tilde{\tau}) & -\sin \theta_n(\tilde{\tau}) & 0 \\ \sin \theta_n(\tilde{\tau}) & \cos \theta_n(\tilde{\tau}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где $\theta_n(\tilde{\tau})$ – истинная аномалия КА n в момент времени $\tilde{\tau}$.

Вариации поправок с учётом вариаций отдельных слагаемых:

$$\delta\{\delta t_{ij}^D\} = (2c)^{-1} [\bar{\mathbf{s}}_j^T \delta \mathbf{r}_j - \bar{\mathbf{s}}_i^T \delta \mathbf{r}_i + A_j \delta j - A_i \delta i],$$

$$\delta\{\delta t_{ij}^{III}\} = -c^{-2} [\bar{\mathbf{v}}_j^T \delta \mathbf{r}_j - \bar{\mathbf{v}}_i^T \delta \mathbf{r}_i + \bar{\mathbf{r}}_j^T \delta \mathbf{v}_j - \bar{\mathbf{r}}_i^T \delta \mathbf{v}_i + B_j \delta j - B_i \delta i],$$

где

$$\bar{\mathbf{s}}_n^T = \tilde{\mathbf{u}}_{mn}^T S_n(\tilde{\rho}_{mn}) + \tilde{\mathbf{u}}_{nm}^T S_n(\tilde{\tau}_{nm});$$

$$\bar{\mathbf{v}}_n^T = \mathbf{v}_n^T(\tilde{\rho}_{mn}) S_n(\tilde{\rho}_{mn}) + \mathbf{v}_n^T(\tilde{\tau}_{nm}) S_n(\tilde{\tau}_{nm});$$

$$\bar{\mathbf{r}}_n^T = \mathbf{r}_n^T(\tilde{\rho}_{mn}) S_n(\tilde{\rho}_{mn}) + \mathbf{r}_n^T(\tilde{\tau}_{nm}) S_n(\tilde{\tau}_{nm});$$

$$A_n = \tilde{\mathbf{u}}_{mn}^T \mathbf{v}_n(\tilde{\rho}_{mn}) + \tilde{\mathbf{u}}_{nm}^T \mathbf{v}_n(\tilde{\tau}_{nm});$$

$$B_n = \mathbf{v}_n^2(\tilde{\rho}_{mn}) + \mathbf{v}_n^2(\tilde{\tau}_{nm}) + \mathbf{r}_n^T(\tilde{\rho}_{mn}) \mathbf{a}_n(\tilde{\rho}_{mn}) + \mathbf{r}_n^T(\tilde{\tau}_{nm}) \mathbf{a}_n(\tilde{\tau}_{nm}).$$

Дисперсии погрешностей разностной σ_{Dij}^2 и релятивистской σ_{IIIij}^2 поправок запишем как

$$\sigma_{Dij}^2 = 4c^{-2} [\bar{\mathbf{s}}_j^T P_r \bar{\mathbf{s}}_j + \bar{\mathbf{s}}_i^T P_r \bar{\mathbf{s}}_i + (A_i^2 + A_j^2) \sigma_\delta^2],$$

$$\sigma_{IIIij}^2 = c^{-4} [\bar{\mathbf{v}}_j^T P_r \bar{\mathbf{v}}_j + \bar{\mathbf{v}}_i^T P_r \bar{\mathbf{v}}_i + \bar{\mathbf{r}}_j^T P_v \bar{\mathbf{r}}_j + \bar{\mathbf{r}}_i^T P_v \bar{\mathbf{r}}_i + (B_i^2 + B_j^2) \sigma_\delta^2],$$

где $P_r = M\{\delta \mathbf{r}_n \delta \mathbf{r}_n^T\}$, $P_v = M\{\delta \mathbf{v}_n \delta \mathbf{v}_n^T\}$ – ковариационные матрицы погрешностей позиции и скорости КА; $M\{\dots\}$ – оператор математического ожидания; $\sigma_\delta = 50$ нс – максимальное СКО ухода часов.

Вариации поправок $\delta\{\delta t_{ij}^D\}$ и $\delta\{\delta t_{ij}^{III}\}$ содержат общие случайные компоненты. Поэтому дисперсия $\sigma_{\Sigma ij}^2$ погрешности суммы $\delta t_{ij}^D + \delta t_{ij}^{III}$ поправок не равна сумме дисперсий этих поправок:

$$\sigma_{\Sigma ij}^2 = \sigma_{Dij}^2 + \sigma_{IIIij}^2 - \frac{1}{2c^3} [\bar{\mathbf{s}}_j^T P_r \bar{\mathbf{v}}_j + \bar{\mathbf{s}}_i^T P_r \bar{\mathbf{v}}_i + (A_i B_i + A_j B_j) \sigma_\delta^2].$$

Максимальное значение СКО σ_{Dij} определения разностной поправки даже при наихудших погрешностях широкоэмитальных эфемерид (табл. 3) не превосходит $\sigma_{Dij} < 73$ фс и ей можно пренебречь. Суммарная погрешность исправленного выражения (20) определяется исключительно погрешностью расчёта релятивистской поправки. Графики $\sigma_{\Sigma ij}$ СКО суммарной погрешности расчёта поправки показаны на рис. 2 для погрешностей различных типов эфемерид, встречающихся на практике (см. табл. 3). Погрешность определения релятивистской поправки на широкоэмитальных эфемеридах (линия 4) превосходит требуемую точность в 1 нс синхронизации часов между двумя КА. Это значение погрешности вписывается в заданные пределы на оперативных эфемеридах СВОЭВП (линия 3), публикуемых с задержкой в 1–2 ч относительно реального времени. Отсюда можно сделать вывод, что максимальный период перезакладки эфемеридной информации на КА, необходимый для межспутниковой синхронизации часов с требуемой точностью, не должен превышать двух часов.

Заключение. Релятивистское рассмотрение задачи межспутниковой синхронизации показывает, что различие в промежутках времени, измеренных бортовыми часами различных КА, обусловлено не только их техническим состоянием. Заметный вклад в это различие вносят движение КА и геометрия пространства-времени, в котором происходит это движение. Для того, чтобы связать измерения двух бортовых часов, необходимо выразить их пространственные траектории через общий параметр – координатное время. Координатное время не является физической величиной и определяется чисто математическими методами. Наблюдения КА выполняются с поверхности Земли и подавляющее большинство пользователей навигационной системы ГЛОНАСС также находится на её поверхности. Поэтому координатное время ГЛОНАСС определяется так, чтобы его ход совпадал с ходом часов наземного наблюдателя.

Синхронизация часов основана на понятии одновременности, под которым в данной работе понимается координатная одновременность, т. е. два события считаются одновременными, если равны значения их координатного времени. Координатная одновременность – чисто математическое понятие, поэтому уходы бортовых часов относительно координатного времени нельзя измерить непосредственно. Эти уходы могут быть получены только в результате вычислительной обработки доступных наблюдений, использующей согласованную модель геометрии околоземного пространства.

Межспутниковые измерения предполагается использовать, в том числе, для определения уходов часов одного КА относительно другого. Так как в конструкции бортовых часов уже учтены основные релятивистские эффекты, то релятивистское выражение для относительного ухода часов можно записать в аналитическом виде, который получается при рассмотрении задачи межспутниковой синхронизации в рамках классической механики. Различие между классическим и релятивистским выражением проявляется в физическом смысле термина *относительный уход часов* и в виде аддитивной релятивистской поправки. В классическом выражении *относительный уход часов* – разность между индивидуальными

техническими уходами часов КА относительно шкалы времени навигационной системы. В релятивистском выражении – это разность между индивидуальными техническими уходами часов КА относительно воображаемых идеальных бортовых часов. Эти часы измеряют собственное время, ход которого относительно других идеальных часов определяется различиями в их траекториях. Релятивистская поправка заметно превосходит требуемую точность межспутниковой синхронизации в 1 нс. Эта поправка должна учитываться при первичной обработке межспутниковых измерений.

При расчёте релятивистской поправки используются векторы координат и скоростей взаимодействующих КА в моменты излучения и приёма электромагнитных сигналов. Погрешности широкоэмитальных эфемерид, имеющихся на борту КА, не позволяют рассчитать эту поправку с приемлемой точностью. Однако уровень погрешностей оперативных эфемерид СВОЭВП, полученных по результатам обработки наблюдений за движением КА в течение 1–2 ч, оказывается достаточным для расчёта релятивистской поправки с СКО 0,6 нс. Поэтому максимальный период перезакладки точных эфемеридных данных, допустимый для нормального функционирования межспутниковой измерительной системы, не должен превышать двух часов.

Список литературы

1. Бакитько Р. В., Болденков Е. Н., Булавский Н. Т. и др. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: монография / Под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. М.: РНИИ КП, 2008. 74 с.
3. Мальцев Г. Н., Сакулин А. Н. Резервы повышения точности навигационных определений потребителей при введении в систему ГЛОНАСС режима межспутниковых измерений // Труды военно-космической академии им А. Ф. Можайского. 2011. № 630. С. 73–77.
4. Щекутьев А. Ф. Оперативная синхронизация бортовых шкал времени аппаратов ГЛОНАСС по межспутниковым измерениям вдоль замкнутой цепочки взаимодействий // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1. С. 134–145.
5. Бартенев В. А., Гречкосеев А. К., Марарескул Т. А. Использование межспутниковых измерений для определения орбит и уходов бортовых часов в КНС ГЛОНАСС // Труды ИПА РАН. 2007. № 17. С. 120–127.
6. Сакулин А. Н., Мальцев Г. Н. Сравнительный анализ вариантов использования в системе ГЛОНАСС радиотехнической и лазерной аппаратуры межспутниковых измерений // I-Methods. 2014. Т. 6. № 3. С. 10–13.
7. Сумерин В. В., Чубыкин А. А., Шаргородский В. Д. Межспутниковая навигационно-связная система // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 3 (7). С. 36–38.
8. Садовников М. А., Сумерин В. В. Беззапросные квантово-оптические системы контроля и передачи шкал времени ГЛОНАСС // Вестник ГЛОНАСС. 2012. № 3 (7). С. 39–42.

9. Шаргородский В. Д., Сумерин В. В., Дмитриев С. В., Григорьев В. Н. Бортовые космические лазерные информационно-измерительные системы // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 8. С. 4–10.
10. Шаргородский В. Д., Косенко В. Е., Садовников М. А., Чубыкин А. А., Мокляк В. И. Роль лазерных средств в обеспечении точности системы ГЛОНАСС // Космические аппараты и технологии. 2013. № 3–4 (6). С. 17–27.
11. Игнатович Е. И., Щекутьев А. Ф. Исследование возможностей модернизации эфемеридно-временного обеспечения КНС ГЛОНАСС с использованием межспутниковых измерений // Сборник трудов XIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Россия, 29–31 мая 2006. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 202–210.
12. Игнатович Е. И., Щекутьев А. Ф. Методы и алгоритмы уточнения частотно-временных параметров и синхронизации бортовых шкал навигационных КА перспективной ГЛОНАСС с использованием межспутниковых измерений // Сборник трудов XIV Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Россия, 28–30 мая 2007. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 322–331.
13. Игнатович Е. И., Щекутьев А. Ф. Результаты имитационных испытаний некоторых вариантов бортовых алгоритмов обработки межспутниковых измерений космических аппаратов ГЛОНАСС // Сборник трудов XV Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Россия, 26–28 мая 2008. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2008. С. 331–337.
14. Лукин А. Б., Чубыкин А. А., Сумерин В. В., Шаргородский В. Д. и др. Модельные оценки информационных свойств межспутниковых измерений лазерной навигационно-связной системы МЛНСС для космического эксперимента на КА ГЛОНАСС // Сборник трудов XVI Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Россия, 25–27 мая 2009. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С. 259–264.
15. Чубыкин А. А., Сумерин В. В., Шаргородский В. Д., Золкин И. А., Игнатович Е. И., Щекутьев А. Ф. Новые результаты в области обработки и применения межспутниковых измерений // Сборник трудов XIX Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Россия, 28–30 мая 2012. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 306–314.
16. Мильковский А. Г., Середин С. В., Карутин С. Н., Игнатович Е. И., Золкин И. А., Щекутьев А. Ф. Направления развития методов и средств высокоточной синхронизации шкал времени НКА ГЛОНАСС с использованием межспутниковых навигационно-связных технологий // Сборник трудов XXII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, Санкт-Петербург, Россия, 25–27 мая 2015. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 429–438.
17. Марарескул Т. А., Гречкосеев А. К., Василенко А. В. Эксперимент по синхронизации бортовых шкал времени навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС по взаимным межспутниковым измерениям // Радиотехника. 2013. № 6. С. 18–21.
18. Чубыкин А. А., Рой Ю. А., Корнишев О. М., Падун П. П. Использование бортовых лазерных измерительно-связных средств для повышения точности и оперативности эфемеридно-временного обеспечения спутников системы ГЛОНАСС // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 7. Т. 12. С. 25–30.
19. Дмитриев С. В. Относительность одновременности событий в лазерных измерениях с искусственными спутниками Земли // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. № 8. С. 38–43.
20. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. II. Теория поля. 7-е изд., испр. М.: Наука, 1988. 512 с.
21. Kloner S. A. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1992, vol. 53, no. 1, pp. 81–109.
<https://doi.org/10.1007/BF00049363>
22. *Relativistic Geodesy: Foundations and Applications*, ed. D. Puetzfeld, C. Lämmerzahl, Springer, 2019, 479 p.
23. Борисова Л. Б., Бронников К. А., Мельников В. Н. Учёт гравитационно-релятивистских эффектов при введении единой шкалы времени на Земле и в околоземном пространстве // Измерительная техника. 1988. № 5. С. 31–33.
24. Handbook. Satellite time and frequency transfer and dissemination, ITU Radiocommunication Bureau, Geneva, 2010, 199 p.
25. Брумберг В. А. Релятивистские эффекты при радиолокационных, оптических и радиоинтерферометрических измерениях // Астрономический журнал. 1981. Т. 58. № 1. С. 181–193.

References

1. Bakit'ko R. V., Boldenkov E. N., Bulavskii N. T. etc., *GLONASS. Printsipy postroeniya i funktsionirovaniya: monografiya*, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russ.)
2. Global navigation satellite system GLONASS. Interface control document. Navigation radio signal in bands L1, L2. Edition 5.1, Moscow, RSS Publ., 2008, 63 p.
3. Mal'tsev G. N., Sakulin A. N., *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, 2011, no. 630, pp. 73–77. (In Russ.)
4. Shchekut'ev A. F., *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2014, no. 1, pp. 134–145. (In Russ.)
5. Bartenev V. A., Grechkoseev A. K., Marareskul T. A., *Transactions of IAA RAS*, 2007, no. 17, pp. 120–127. (In Russ.)
6. Sakulin A. N., Mal'tsev G. N., *I-Methods*, 2014, vol. 6, no. 3, pp. 10–13. (In Russ.)
7. Sumerin V. V., Chubykin A. A., Shargorodskii V. D., *GLONASS Herald*, 2012, no. 3, pp. 36–38. (In Russ.)
8. Sadovnikov M. A., Sumerin V. V., *GLONASS Herald*, 2012, no. 3, pp. 39–42. (In Russ.)
9. Shargorodskii V. D., Sumerin V. V., Dmitriev S. V., Grigor'ev V. N., *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2014, no. 8, pp. 4–10. (In Russ.)
10. Shargorodskii V. D., Kosenko V. E., Sadovnikov M. A., Chubykin A. A., Moklyak V. I., *Spacecrafts & Technologies*, 2013, no. 3–4, pp. 17–27. (In Russ.)
11. Ignatovich E. I., Schekut'ev A. F., *Research-Analysis of Opportunities of GNSS GLONASS Ephemerides-Time Maintenance Modernization Using Intersatellite Measurement System*, Proceedings

of the 13th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia, CSRI Elektropribor, May 29–31, 2006, pp. 202–210.

12. Ignatovich E. I., Schekut'ev A. F., *Methods and Algorithms of Frequency-Time Parameters Refinement and Onboard Clock Synchronization for Modernized GNSS Glonass Spacecrafts with Use of Intersatellite Measurements*, Proceedings of the 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia, CSRI Elektropribor, May 28–30, 2007, pp. 322–331.

13. Ignatovich E. I., Schekut'ev A. F., *Simulations results of some variants of onboard intersatellite measurements processing algorithms for GLONASS space vehicles*, Proceedings of the 15th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia, CSRI Elektropribor, May 26–28, 2008, pp. 331–337.

14. Lukin A. B., Chubykin A. A., Sumerin V. V., Shargorodskii V. D., Zolkin I. A., Ignatovich E. I., Schekut'ev A. F., *Model Estimation of Intersatellite Measurements Information Features of Laser Navigation-Link System ISLNLs for Space Experiment 2009 on 2 SC GLONASS*, Proceedings of the 16th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia, CSRI Elektropribor, May 25–27, 2009, pp. 259–264.

15. Chubykin A. A., Sumerin V. V., Shargorodskii V. D., Zolkin I. A., Ignatovich E. I., Schekut'ev A. F., *New Results in the Field of Processing and Using Intersatellite Measurements*, Proceedings of the 19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia, CSRI Elektropribor, May 28–30, 2012, pp. 306–314.

16. Milkovskiy A. G., Seredin S. V., Karutin S. N., Ignatovich E. I., Zolkin I. A., Schekut'ev A. F., *Lines of Development of Methods and Means of GLONASS SVs Time Scales High Accuracy Synchronization Using Intersatellite Navigation-Link Technologies*, Proceedings of the 22th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Russia, CSRI Elektropribor, May 25–27, 2015, pp. 429–438.

17. Marareskul T. A., Grechkoseev A. K., Vasilenko A. V., *Radiodengineering*, 2013, no. 6, pp. 18–21. (In Russ.)

18. Chubykin A. A., Roi Yu. A., Kornishev O. M., Padun P. P., *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2007, no. 7, pp. 25–30. (In Russ.)

19. Dmitriev S. V., *Journal Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2014, no. 8, pp. 38–43. (In Russ.)

20. Landau L. D., Lifshitz E. M., *The classical theory of fields (course of theoretical physics; v.2)*, Butterworth-Heinemann, 1975, 428 p.

21. Klioner S. A. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1992, vol. 53, no. 1, pp. 81–109.
<https://doi.org/10.1007/BF00049363>

22. *Relativistic Geodesy: Foundations and Applications*, ed. D. Puetzfeld, C. Lämmerzahl, Springer, 2019, 479 p.

23. Borisova L. B., Bronnikov K. A., Mel'nikov V. N., *Measurement Techniques*, 1988, vol. 31, no. 5, pp. 450–455.
<https://doi.org/10.1007/BF00864470>

24. Handbook. Satellite time and frequency transfer and dissemination, ITU Radiocommunication Bureau, Geneva, 2010, 199 p.

25. Brumberg V. A., *Soviet Astronomy*, 1981, vol. 25, Jan.-Feb., pp. 101–107.

Статья поступила в редакцию 24.12.2020; принята к публикации 03.03.2021.

Повышение точности измерений магнитного момента корабля в дальнем поле

Алексей Александрович Затеев¹, Юрий Михайлович Иванов², Валентин Григорьевич Семенов³

АО «МЕРА», Санкт-Петербург, Россия, mail@mera.spb.ru✉

¹z1195522@gmail.com

²210848@gmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24741016200>

³valentinesemenov@hotmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197152206>

Аннотация. Измерения магнитного момента корабля необходимы для контроля защищённости от магнитных мин и скрытности по магнитному полю. Рассмотрена модификация метода измерения магнитного момента корабля с использованием трёхкомпонентного дифференциального магнитометра. С помощью компьютерного моделирования проведено сравнение погрешностей разработанного авторами метода с известными аналогами и установлено его преимущество по точности (практически на порядок). Показано, что предложенный метод можно также применять для магнитных моделей кораблей и стандартных образцов магнитных материалов для определения компонент петель гистерезиса по намагниченности.

Ключевые слова: магнитные измерения, магнитный момент, средняя намагниченность, дифференциальный магнитометр, корабли, модели, стандартные образцы

Для цитирования: Затеев А. А., Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Повышение точности измерений магнитного момента корабля в дальнем поле // Измерительная техника. 2021. № 8. С. 67–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-8-67-72>

Improving accuracy for measuring the ship's magnetic moment in the far field

Aleksei A. Zateev¹, Yury M. Ivanov², Valentin G. Semenov³

MERA JSC, St. Petersburg, Russia, mail@mera.spb.ru✉

¹z1195522@gmail.com

²210848@gmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24741016200>

³valentinesemenov@hotmail.com, <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197152206>

Abstract. The magnetic moment of the ship is measured to control its protection from magnetic mines and to control the stealth by the magnetic field. A modification of the measurement method using a three-component differential magnetometer is considered. Using computer simulation, the errors of the new method are compared with those of the known analogues and its advantage in accuracy is established (almost by an order of magnitude). It is shown that the new method can also be used for magnetic models of ships and standard samples of magnetic materials to determine their components of the hysteresis loops by magnetization.

Keywords: magnetic measurements, magnetic moment, average magnetization, differential magnetometer, ships, models, standard samples

Введение. Защищённость корабля от магнитных мин и скрытность подводных лодок от магнитных средств обнаружения контролируют по численным значениям их магнитного момента. Контролируемым параметром является магнитный момент, а наиболее простым методом его измерения – двухточечный магнитометрический метод в дальнем поле, т. е. на расстоянии более половины длины корабля до дифференциального магнитометра (ДМ). ДМ измеряет разность магнитной индукции трёхкомпонентных феррозондовых измерительного и компенсационного датчиков на фоне

магнитного поля Земли. В работах [1–8] представлены оценки точности таких измерений, согласно которым феррозондовые ДМ не обладают достаточным запасом по точности измерений магнитного момента в дальнем поле. Для измерений магнитной индукции также используются модульные (квантовые) магнитометры, имеющие более высокие точность и стабильность по сравнению с феррозондовыми магнитометрами. Однако модульные магнитометры по определению измеряют только одну (инвариантную) компоненту – проекцию магнитной индукции на её направление,

и этого недостаточно для измерения вектора магнитной индукции. В последние годы появились предложения [9] по обращению квантовых магнитометров в трёхкомпонентные, т. е. созданию трёхкомпонентных магнитометров на базе квантовых датчиков.

Цель работы – оценка повышения точности измерения магнитного момента корабля при замене традиционных трёхкомпонентных (феррозондовых) магнитометров квантовыми с применением соответствующего методического обеспечения.

Корректирующие матрицы трёхкомпонентного ДМ. В работе [3] представлена следующая модель уравнения измерения трёхкомпонентным магнитометром:

$$\mathbf{B}_и = u\mathbf{B} + \mathbf{0}, \quad (1)$$

где $\mathbf{B}_и$ – результат измерения магнитометром (три числа); u – искажающая матрица размером 3×3 в собственной ортогональной системе координат (СОСК) в общем случае неортогонального магнитометра; $\mathbf{B}$ – действительное значение магнитной индукции в СОСК магнитометра; $\mathbf{0}$ – уход нулей магнитометра (три числа).

Если заранее по методике [3] определить искажающую матрицу и уход нулей, то каждый последующий результат измерения $\mathbf{B}_и$ (1) можно исправлять с помощью корректирующей матрицы $k \cong u^{-1}$:

$$\mathbf{B}' = k(\mathbf{B}_и - \mathbf{0}). \quad (2)$$

Тогда с учётом уравнения (1) погрешность до коррекции (2) запишем как сумму мультипликативной и аддитивной частей

$$\Delta\mathbf{B} = \mathbf{B}_и - \mathbf{B} = (u - I)\mathbf{B} + \mathbf{0}. \quad (3)$$

где I – единичная матрица.

Погрешность после коррекции определяется выражением

$$\Delta\mathbf{B}' = \mathbf{B}' - \mathbf{B} = (ku - I)\mathbf{B} + \Delta\mathbf{0}, \quad (4)$$

где $\Delta\mathbf{0}$ – погрешность определения уходов нулей.

В соответствии с выражениями (3), (4) для уменьшения погрешности трёхкомпонентного магнитометра следует повышать точность определения его корректирующей матрицы и уходов нулей.

Аналог скорректированного уравнения (2) для ДМ имеет следующий вид [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}'_{и.к} &= \sigma_{к.и} \mathbf{B}'_и - \mathbf{B}'_к = \sigma_{к.и} k_{и} (\mathbf{B} - \mathbf{0})_и - k_к (\mathbf{B} - \mathbf{0})_к = \\ &= \sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{B}_и - k_к \mathbf{B}_к - (\sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{0}_и - k_к \mathbf{0}_к) = \mathbf{B}'_{и.к(м)} - \Delta\mathbf{0}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\mathbf{B}'_{и.к}$ – результат измерения ДМ, скорректированный в СОСК компенсационного канала, нижние индексы «и» и «к» указывают на принадлежность соответственно к измерительному и компенсационному каналам ДМ; $\sigma_{к.и}$ – матрица ортогонального преобразования из СОСК измерительного в СОСК компенсационного магнитометра (методика

определения σ предложена в работе [5]); $\mathbf{B}'_и, \mathbf{B}'_к$ – результаты измерений магнитной индукции, скорректированные в СОСК измерительного и компенсационного каналов соответственно; $(\mathbf{B} - \mathbf{0})_и, (\mathbf{B} - \mathbf{0})_к$ – результаты измерений магнитной индукции в измерительном и компенсационном каналах соответственно; $\mathbf{B}'_{и.к(м)} = \sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{B}_и - k_к \mathbf{B}_к$ – мультипликативная часть результата измерения ДМ; $\Delta\mathbf{0} = \sigma_{к.и} k_{и} \mathbf{0}_и - k_к \mathbf{0}_к$ – аддитивная часть результата измерений ДМ.

Уравнения измерений магнитного момента корабля в дальнем поле. Как показано в работе [1], традиционное уравнение измерений магнитного момента в дальнем поле имеет вид

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{изм} &= \mathbf{M} + \Delta\mathbf{M}_{мет} = A\mathbf{B}_{и.к} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\nabla \nabla \frac{1}{R_и} - \nabla \nabla \frac{1}{R_к} \right)^{-1} \mathbf{B}_{и.к} = \\ &= \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\frac{3\mathbf{n}_и \mathbf{n}_и^T - I}{R_и^3} - \frac{3\mathbf{n}_к \mathbf{n}_к^T - I}{R_к^3} \right)^{-1} \mathbf{B}_{и.к}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\mathbf{M} = M\mathbf{m}$ – измеряемый (дипольный) магнитный момент тела; $M, \mathbf{m}$ – модуль и единичный вектор магнитного момента; $\Delta\mathbf{M}_{мет}$ – методическая погрешность или погрешность уравнения измерений, или погрешность, обусловленная недипольностью корабля; $\mathbf{M}_{изм}$ – результат измерений; A – обратная координатная 3×3 матрица; $\nabla \nabla \frac{1}{R_и}, \nabla \nabla \frac{1}{R_к}$ – градиенты градиентов

обратных расстояний $R_и, R_к$ от центра корабля до измерительного и компенсационного датчиков соответственно; $\mathbf{n}_и$ – единичное направление между центром корабля и датчиками (рис. 1); $\mathbf{n}_и \mathbf{n}_и^T$ – симметричная матрица 3×3 , образованная умножением матрицы-столбца $\mathbf{n}_и$ справа на транспонированную матрицу-строку $\mathbf{n}_и^T$ (аналогично для компенсационного датчика); верхний индекс «-1» – символ обращения матрицы; $\mathbf{B}_{и.к}$ – разность индукций магнитного поля измерительного и компенсационного датчиков ДМ.

Для упрощения рассмотрим (6) при измерительном и компенсационном датчиках, лежащих на одной оси с центром 0, т. е. при $\mathbf{n}_и = \mathbf{n}_к = \mathbf{n}$, как показано на рис. 1.

Вычислив обратную координатную матрицу A в общем виде, получим

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{изм} &= \mathbf{M} + \Delta\mathbf{M}_{мет} = A\mathbf{B}_{и.к} = \frac{4\pi}{\mu_0} \frac{R_и^3}{1 - \gamma^3} (3\mathbf{n}\mathbf{n}^T - I)^{-1} \mathbf{B}_{и.к} = \\ &= \frac{4\pi}{\mu_0} \frac{R_и^3}{1 - \gamma^3} \left(\frac{3}{2} \mathbf{n}\mathbf{n}^T - I \right) \mathbf{B}_{и.к}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\gamma = R_и / R_к$.

В работе [6] предложено уравнение измерений магнитного момента, в котором координатный оператор A уравнения (7) заменяется усреднённым оператором $A_{ср}$, получаемым при разбиении по длине корабля на p участков:

$$\mathbf{M} + \Delta\mathbf{M}_{мет} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\frac{C_1 + C_2 + \dots + C_i + \dots + C_p}{p} \right)^{-1} \mathbf{B}_{и.к} = A_{ср} \mathbf{B}_{и.к}, \quad (8)$$

где $C_i = \left(\nabla \nabla \frac{1}{R_и} - \nabla \nabla \frac{1}{R_к} \right)_i$.

Метод (8) подвергался экспериментальной проверке [8]. Большой интерес представляет следующая модификация данного метода:

$$\mathbf{M} + \Delta \mathbf{M}_{\text{мет}} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\frac{m_1 C_1 + m_2 C_2 + \dots + m_i C_i + \dots + m_p C_p}{m} \right)^{-1} \mathbf{B}_{\text{и.к}}, \quad (9)$$

где m_i , m – ферромагнитные массы i -го участка и всего корабля соответственно.

Далее сравним точность методов (8), (9) и традиционного метода (7).

Классификация погрешностей измерений магнитного момента. Результирующая погрешность измерений магнитного момента в дальнем поле имеет вид

$$\Delta \mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{изм}} - \mathbf{M} = \Delta \mathbf{M}_{\text{мет}} + \delta_{\text{м}} \mathbf{M} + \mathbf{M}_0 + \mathbf{M}_{\text{п}} + \Delta \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{и.к}}, \quad (10)$$

где $\delta_{\text{м}} \mathbf{M}$ – инструментальная мультипликативная составляющая; $\delta_{\text{м}}$ – безразмерная матрица 3×3 ; $\mathbf{M}_0$ – аддитивная составляющая погрешности; $\mathbf{M}_{\text{п}}$ – аддитивная погрешность ДМ, обусловленная внешними помехами; $\Delta \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{и.к}}$ – координатная (линейно-угловая) составляющая погрешности ДМ.

Аддитивная погрешность $\mathbf{M}_0$ включает постоянную составляющую $|\mathbf{M}_0|$ (обусловлена разностью уходов нулей измерительного и компенсационного магнитометров Δ_0) и случайные составляющие $\mathbf{M}'_0$ (связаны с собственными шумами ДМ и внешними помехами).

Аналитическое выражение мультипликативной составляющей погрешности приведено в работе [6]:

$$\delta_{\text{м}} \mathbf{M} = \left(\frac{3}{2} \mathbf{n} \mathbf{n}^T - \mathbf{I} \right) \frac{(u_{\text{и}} \sigma_{\text{к.и}} - I) - \gamma^3 (u_{\text{к}} - I)}{1 - \gamma^3} (3 \mathbf{n} \mathbf{n}^T - \mathbf{I}) \mathbf{M}, \quad (11)$$

где $u_{\text{и}}$, $u_{\text{к}}$ – искажающие матрицы измерительного и компенсационного каналов ДМ.

Запишем расчётные формулы остальных составляющих результирующей погрешности (10):

$$\sigma_{\mathbf{M}_0} = \frac{6\pi}{\mu_0} \frac{R_{\text{и}}^3}{1 - \gamma^3} \sigma_{\text{Вг}} \sqrt{2}; \quad (12)$$

$$|\Delta \mathbf{M}_0| = \frac{4\pi}{\mu_0} \frac{R_{\text{и}}^3}{1 - \gamma^3} \left| \left(\frac{3}{2} \mathbf{n} \mathbf{n}^T - \mathbf{I} \right) \Delta_0 \right|; \quad (13)$$

$$\sigma_{\mathbf{M}_{\text{п}}} = \frac{2z R_{\text{и}}^3 \sigma_{\text{I}}}{1 - \gamma^3} \left(\frac{1}{\rho_{\text{и}}^2} - \frac{1}{\rho_{\text{к}}^2} \right); \quad (14)$$

$$\sigma_{\mathbf{M}_{\text{R}}} = \frac{3}{2} (7\varphi^2 + 5)^{1/2} \frac{(1 + \gamma^8)^{1/2}}{1 - \gamma^3} \frac{\sigma_{\text{R}}}{R_{\text{и}}} M. \quad (15)$$

Здесь $\sigma_{\mathbf{M}_0}$ – среднее квадратическое отклонение (СКО) случайной части $\mathbf{M}_0$; $\sigma_{\text{Вг}}$ – СКО шумов однотипных измерительного и компенсационного датчиков; $\sigma_{\mathbf{M}_{\text{п}}}$ – СКО случайной погрешности $\mathbf{M}_{\text{п}}$ [10]; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{к}}$ – расстояния от линии ж/д электротранспорта до измерительного и компенсационного датчиков; $2z$ – расстояние между токопроводами линии

железнодорожного электротранспорта; σ_{I} – СКО суммы токов прямой и обратной колеи; $\sigma_{\mathbf{M}_{\text{R}}}$ – СКО координатной составляющей погрешности измерений магнитного момента; $\varphi = \mathbf{m} \mathbf{n}$; σ_{R} – СКО погрешностей измерения компонент радиус-векторов $\mathbf{R}$. В формуле (14) рассмотрена погрешность, создаваемая линиями ж/д электротранспорта при их непосредственной близости к магнитоизмерительной системе. Общеизвестно, что колебания токов в сети питания электротранспорта на постоянном токе (электричка, метро, трамвай, троллейбус) создают максимальные помехи магнитометрии. Чтобы уменьшить влияние таких помех, морские магнитоизмерительные стенды размещают за городом, как можно дальше от ближайшей линии электротранспорта на постоянном токе. В работе [10] построена модель таких помех, учитывающая среди прочих факторов расстояние между линией транспорта и магнитометром.

Выражения (12), (13), (15) выведены в работе [1]. Обратим внимание на то, что аддитивные составляющие (12)–(14) нарастают в третьей степени расстояния $R_{\text{и}}$ и могут быть доминирующими для методов измерений магнитного момента в дальнем поле. Отметим также, что в системах магнитного поиска [4] σ_{R} пропорционально пятой степени расстояния $R_{\text{и}}$.

Компьютерное моделирование погрешностей измерений магнитного момента. С помощью компьютерного моделирования (КМ) в пакете МАТЛАБ удобно имитировать разнообразные аспекты измерений [4], в частности, погрешности измерений магнитного момента в дальнем поле.

Инструментальные погрешности. Сравним аналитические оценки (11)–(15) и КМ-оценки инструментальных составляющих погрешностей ДМ при модуле магнитного момента $M = 10^5 \text{ Ам}^2$, длине объекта измерений $L = 121 \text{ м}$ и расстоянии между датчиками ДМ, равном 50 м . Результаты сравнения представлены в табл. 1, где координатная погрешность получена при $\varphi = 0,1$, $\sigma_{\text{R}} = 0,3 \text{ м}$, а аддитивные составляющие погрешности приведены при следующих параметрах:

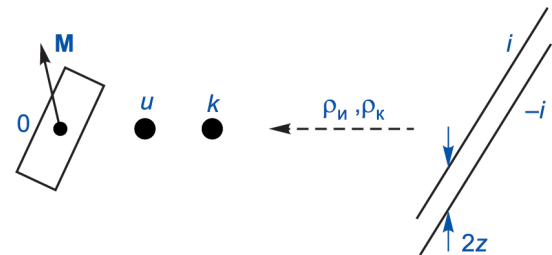


Рис. 1. Схема измерений магнитного момента корабля в дальнем поле:

$\mathbf{M}$ – вектор магнитного момента; u , k – измерительный и компенсационный датчики ДМ (лежат на одной оси с центром 0); $2z$ – расстояние между токопроводами (+i, -i) линии железнодорожного электротранспорта; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{к}}$ – расстояния от линии железнодорожного электротранспорта до измерительного и компенсационного датчиков соответственно

Fig. 1. Measurement scheme of the MM of the ship in the far field
 $\mathbf{M}$ – the MM vector; u , k – measuring and compensation sensors of the DM (both lying on the same axis with the 0 – center); $2z$ – the distance between the current wires (+i, -i) of the electric railway line; $\rho_{\text{и}}$, $\rho_{\text{к}}$ – distances between the railway and the measuring and compensation sensors

Таблица 1

Таблица 2

Относительные инструментальные погрешности измерения магнитного момента

$R_{и}/L$	$\delta_M M$		σ_{M_0}/M		$ \Delta M_0 /M$		σ_{M_n}/M		σ_{M_R}/M	
	(11)	КМ	(12)	КМ	(13)	КМ	(14)	КМ	(15)	КМ
0,50	0,0190	0,0184	0,0057	0,0056	0,0022	0,0021	0,0006	0,0006	0,0206	0,0201
0,75	0,0210	0,0203	0,0216	0,0217	0,0085	0,0082	0,0023	0,0023	0,0155	0,0155
1,00	0,0233	0,0226	0,0592	0,0582	0,0230	0,0222	0,0062	0,0062	0,0139	0,0134
1,25	0,0259	0,0251	0,1290	0,1275	0,0503	0,0488	0,0136	0,0142	0,0122	0,0122
1,50	0,0287	0,0278	0,2410	0,2448	0,0966	0,0936	0,0260	0,0260	0,0119	0,0115
1,75	0,0316	0,0307	0,4408	0,4280	0,1688	0,1637	0,0460	0,0440	0,0111	0,0111
2,00	0,0346	0,0336	0,7028	0,6979	0,2753	0,2670	0,0740	0,0740	0,0114	0,0107
2,25	0,0377	0,0366	1,0820	1,0780	0,4253	0,4125	0,1150	0,1050	0,0108	0,0105

Относительные методические погрешности измерений магнитного момента по уравнениям (7)–(9)

$R_{и}/L$	$\delta M_{мет}$		
	(7)	(8)	(9)
0,50	0,39	0,092	0,062
0,75	0,26	0,070	0,031
1,00	0,18	0,058	0,019
1,25	0,13	0,049	0,013
1,50	0,10	0,042	0,010
1,75	0,08	0,036	0,008
2,00	0,07	0,032	0,006
2,25	0,06	0,029	0,005

$\sigma_{B_i} = 10^{-10}$ Тл (собственные шумы ДМ); $|\Delta_0| = 1,3 \cdot 10^{-10}$ Тл (уходы нулей ДМ); $\sigma_I = 10^3$ А, $\rho = 1500$ м, $z = 4$ м (помехи от линии электро тяги).

Из табл. 1 следует, что значения соответствующих пар аналитических и КМ-оценок достаточно близки, что подтверждает правильность выводов соотношений (11)–(15).

Характер соотношения между мультипликативной составляющей инструментальной погрешности (11) и аддитивной составляющей от уходов нулей (13) проиллюстрирован на рис. 2. При измерениях в ближних полях ($R_{и}/L \leq 0,5$) мультипликативная составляющая погрешностей преобладает

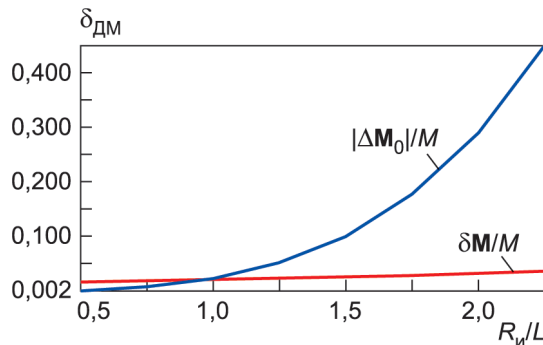


Рис. 2. Относительные мультипликативная $\delta M/M$ (11) и аддитивная $|\Delta M_0|/M$ (13) составляющие погрешности ДМ в зависимости от расстояния $R_{и}/L$

Fig. 2. Relative multiplicative $\delta M/M$ (11) and relative additive $|\Delta M_0|/M$ (13) parts of the error of the DM depending on the distance $R_{и}/L$

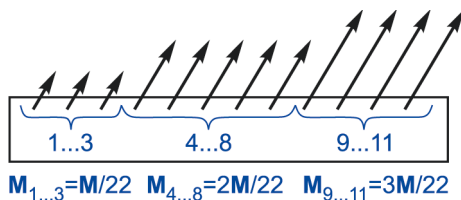


Рис. 3. Модель распределения магнитного момента по длине корабля при разбиении $M = 10^5(0,3; 0,1; (1 - 0,3^2 - 0,1^2)^{1/2})$ на 11 участков

Fig. 3. the MM distribution model when $M = 10^5(0,3; 0,1; (1 - 0,3^2 - 0,1^2)^{1/2})$ divided along the ship into 11 sections

и уходами нулей, как правило, пренебрегают. Но в дальнем поле ($R_{и}/L > 0,5$) погрешность ухода нулей лавинообразно нарастает и снижает точность измерений магнитного момента с помощью феррозондовых ДМ. Заметим, что модульные магнитометры практически не имеют уходов нулей.

Методические погрешности. Вычислим КМ-оценки относительных методических составляющих для условного распределения магнитного момента по длине L корабля при разбиении $M = 10^5(0,3; 0,1; (1 - 0,3^2 - 0,1^2)^{1/2})$ на 11 участков (рис. 3). Для определённости выберем конкретные значения компонент магнитного момента, чтобы сравнивать методические мероприятия по уменьшению погрешностей измерения магнитного момента в одинаковых условиях. Методические погрешности рассчитаем по уравнениям измерений магнитного момента (7)–(9) без учёта инструментальных погрешностей. Результаты вычислений представлены в табл. 2 и на рис. 4.

Номинально метод (8) рассчитан на равномерное распределение магнитного момента по длине L , но его можно использовать и для рассмотренного неравномерного распределения (см. рис. 3), обеспечивая более высокую точность в сравнении с традиционным методом (7). Наиболее высокую точность обеспечивает метод (9).

Инструментальные погрешности ДМ разных классов. Для обобщённого анализа инструментальных составляющих погрешности измерений магнитного момента разделим на три

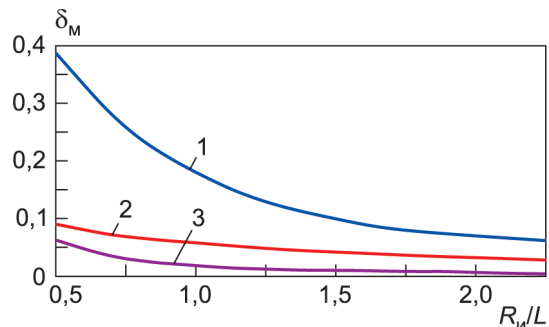


Рис. 4. Оценки относительных методических погрешностей методов измерений магнитного момента (7)–(9) – кривые 1–3 соответственно

Fig. 4. Estimates of the relative methodical errors for methods (7)–(9) – 1–3

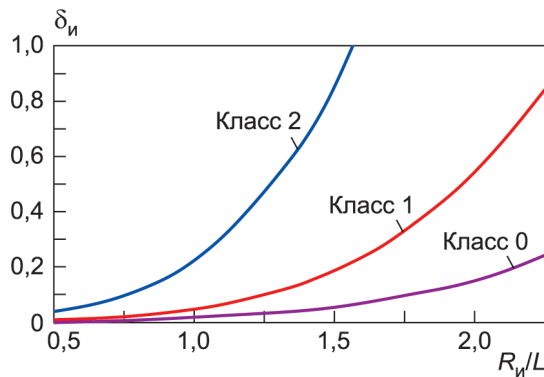


Рис. 5. Инструментальные погрешности ДМ классов 0–2

Fig. 5. Instrumental errors for the different DM classes 0–2

Таблица 3
Точностные аргументы инструментальных погрешностей ДМ 0–2 классов

Аргумент, формула	Класс ДМ		
	0	1	2
$\ u_n - I\ $, (3)	0,003	0,003	0,03
$\ u_k - I\ $, (4)	0,002	0,002	0,02
$\ \sigma_{и.к} - I\ $, (5)	0,003	0,003	0,03
$ \Delta 0_{и.к} $, нТл (13)	0	0,130	0,13
σ_{B_i} , нТл (12)	0,010	0,010	0,10

класса ДМ, основанные на различных датчиках: традиционных феррозондовых датчиках (класс 2); феррозондовых датчиков с коррекцией и угловым согласованием [3, 5] (класс 1); трёхкомпонентных квантовых датчиков [9] (класс 0).

В табл. 3 указаны точностные аргументы, которые выбраны для характеристики инструментальных составляющих погрешностей измерений с учётом условий моделирования и факторов, влияющих на составляющие погрешностей (см. табл. 1, характеристики координатной погрешности и помех от железнодорожной линии). Значение точностного аргумента для заданного класса ДМ определяет значение соответствующей составляющей инструментальной погрешности.

В табл. 4 и на рис. 5 представлены соответствующие КМ-оценки относительных инструментальных погрешностей.

Погрешности от помех железнодорожной линии электропутья на постоянном токе. В табл. 5 приведены оценки помех для схемы на рис. 1 при $2z = 8$ м, СКО суммы токов прямой и обратной колеи $\sigma_I = 1000$ А в зависимости от относительного расстояния R_n/L и удалённости ρ железнодорожной линии от ДМ.

Результирующие погрешности измерений. Для определения результирующих погрешностей вычисляют КМ-оценки соответствующих уравнений измерений с учётом всех источников погрешностей, получают ряд результатов измерений (вектора) магнитного момента, находят СКО и среднее значение этого ряда и вычисляют итоговое значение в виде суммы среднего и утроенного СКО, делённого на модуль магнитного момента. Результаты КМ-оценок относительных результирующих погрешностей измерений магнитного момента представлены в табл. 6 и на рис. 6.

Таблица 4

КМ-оценки относительных инструментальных погрешностей

R_n/L	Класс ДМ		
	0	1	2
0,50	0,001	0,004	0,037
0,75	0,005	0,016	0,092
1,00	0,013	0,045	0,220
1,25	0,029	0,096	0,460
1,50	0,052	0,185	0,850
1,75	0,095	0,324	1,530
2,00	0,149	0,537	2,450
2,25	0,240	0,830	3,750

Таблица 5

Относительные помехи от линии электропутья

R_n/L	500	1000	1500	2000
0,50	0,047	0,002	0,0006	0,0002
0,75	0,180	0,007	0,0020	0,0010
1,00	0,480	0,019	0,0060	0,0030
1,25	1,090	0,040	0,0140	0,0060
1,50	1,790	0,076	0,0260	0,0110
1,75	3,400	0,150	0,0440	0,0200
2,00	5,400	0,210	0,0740	0,0300
2,25	8,700	0,370	0,1100	0,0500

Таблица 6

Оценки относительных результирующих погрешностей измерений магнитного момента

R_n/L	Класс ДМ, формула		
	0, (9)	1, (8)	2, (7)
0,50	0,065	0,093	0,42
0,75	0,038	0,075	0,34
1,00	0,036	0,067	0,37
1,25	0,047	0,092	0,57
1,50	0,070	0,190	0,89
1,75	0,110	0,340	1,49
2,00	0,170	0,550	2,54
2,25	0,250	0,850	3,83

Обсуждение результатов и выводы. Исследование точностных возможностей трёх наиболее простых (двухточечных) магнитометрических методов измерения магнитного момента проведено в предположении линейной модели преобразования ДМ. С увеличением расстояния от исследуемого объекта до места измерения уменьшается методическая составляющая погрешности и резко увеличиваются аддитивные составляющие инструментальных погрешностей. На некотором оптимальном расстоянии совместное влияние методических и инструментальных погрешностей минимизируется.

Результирующая погрешность измерений магнитного момента при оптимальном расстоянии для традиционного метода измерения (см. формулу (7)) с ДМ класса 2 составляет не менее 34 %, для методов с уравнениями измерений (8), (9) (для ДМ классов 1 и 0 соответственно) эта погрешность уменьшается до 6,7 и 3,6 % соответственно (см. табл. 6, результаты выделены полужирным шрифтом).

Трёхкомпонентный ДМ класса 0 можно реализовать путём модификации квантовых магнитометров [9] в сочетании с методами корректирующих матриц [3] и углового согласования ДМ [5].

Ожидаемые преимущества замены феррозондовых трёхкомпонентных ДМ квантовыми модификациями состоят в строгой линейности преобразования, пренебрежимо малых уходах нулей и увеличении числа разрядов отсчёта результата измерения. При этом метод корректирующих матриц [3] позволит устранить влияния остаточных неортогональностей магниточувствительных осей ДМ.

Обратим также внимание на то, что уравнение измерения магнитного момента (9) обращается в уравнение (6) для тела в виде одного участка и в уравнение (8) при условно равномерном распределении намагниченности по длине тела. Таким образом, метод с уравнением измерений (9) является обобщением методов с уравнениями (6), (8).

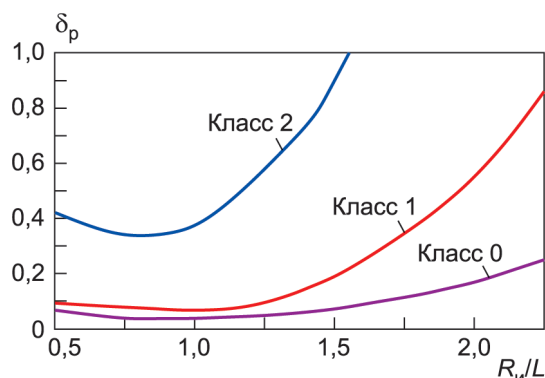


Рис. 6 Относительные результирующие погрешности измерений магнитного момента ДМ классов 2, 1, 0, рассчитанные по уравнениям измерений (7)–(9) соответственно

Fig. 6 Resulting relative errors of the MM measurement for the DM classes 2, 1, 0, calculated according to the measurement equations (7)–(9), respectively

Закключение. Помимо натурных измерений магнитных моментов кораблей и подводных лодок методы на основе уравнений (8), (9) можно рекомендовать для измерений магнитных моментов маломасштабных магнитных моделей натуральных объектов при разделении индуктивных и постоянных составляющих магнитных моментов кораблей [2], а также для разнообразных измерений образцов магнитных материалов в виде стержней и пластин, например, для измерения компонентов петель усреднённой намагниченности при циклическом перемагничивании образцов.

Список литературы

1. Семенов В. Г., Сонина В. Э. Анализ методов измерений магнитных моментов // Метрология. 1992. № 8. С. 3–46.
2. Пат. № 2293345 РФ / Ю. М. Иванов, О. В. Малышев, В. Я. Матисов, В. Г. Семенов // Изобретения. Полезные модели. 2007. № 4.
3. Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Корректирующие матрицы – путь к повышению точности трёхкомпонентных магнитометров // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 46–51.
4. Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Сравнительный анализ методов поиска источника магнитного поля дипольной модели // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 49–54. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-8-49-54>
5. Затеев А. А., Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Согласование координат в магнитоизмерительных системах // Материалы XII Всероссийской конференции «Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в РФ», Поведники, Московская обл., 13–15 ноября 2018. М.: ВНИИФТРИ, 2018. С. 57–60.
6. Гетьман Р. В., Затеев А. А., Иванов Ю. М., Матисов В. Я., Семенов В. Г. Анализ погрешностей измерения магнитного момента кораблей в дальнем поле // Морской вестник. 2018. № 1(65). С. 102–104.

7. Иванов Ю. М., Семенов В. Г. Перспективный метод размагничивания кораблей // Сборник докладов X Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN-2019, Санкт-Петербург, 11–12 июля 2019. С. 209–212.

8. Затеев А. А., Иванов Ю. М., Матисов В. Я. Экспериментальная оценка методов измерений магнитного момента // Сборник докладов X Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» NSN-2019, Санкт-Петербург, 11–12 июля 2019. С. 213–215.

9. Александров Е. Б., Вершовский А. К. и др. Быстродействующий трёхкомпонентный магнитометр-вариометр на основе цезиевого датчика // Журнал технической физики 2006. Т. 76. Вып. 1. С. 115–120.

10. Пат. РФ № 2319973 / Ю. М. Иванов, В. Г. Семенов // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 8.

References

1. Semenov V. G., Sonina V. E., Analysis of measurement methods of magnetic moments, *Metrologiya*, 1992, no. 8. pp. 3–46. (In Russ.)
2. Ivanov Yu. M., Malyshev O. V., Matisov V. Ya., Semenov V. G., RF Patent no. 2293345, *Buyll. Izobret.*, no. 4 (2007).
3. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 674–682. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0264-4>
4. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 823–830. <https://doi.org/10.1007/s11018-017-1277-1>
5. Zateev A. A., Ivanov Yu. M., Semenov V. G., Coordinate adjustment in magnetic measuring systems, *Proceedings of XII All-Russian Conference “Metrological provision of defence and security in Russian Federation”*, Povedniki, Moscow region, November 13–15, 2018, Moscow, VNIIFTRI Publ., pp. 57–60. (In Russ.)
6. Getman R. V., Zateev A. A., Ivanov Yu. M., Matisov V. Ya., Semenov V. G., Analysis of measurement errors of the magnetic moment of ships in the far field, *Morskoi vestnik*, 2018, no. 1 (65), pp. 102–104. (In Russ.)
7. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., The promising method for degaussing, *Proceedings of X International Conference “Navy and Shipbuilding Nowadays” NSN-2019*, Saint-Petersburg, July 11–12, 2019, pp. 209–212.
8. Zateev A. A., Ivanov Yu. M., Matisov V. Ya., Experimental evaluation of methods for measuring magnetic moment, *Proceedings of X International Conference “Navy and Shipbuilding Nowadays” NSN-2019*, Saint-Petersburg, July 11–12, 2019, pp. 213–215.
9. Aleksandrov E. B., Vershovskiy A. K. et.al., Fast three-component magnetometer-variometer based on a cesium sensor, *Technical Physics*, 2006, vol. 76, no. 1, pp. 115–120. (In Russ.)
10. Ivanov Yu. M., Semenov V. G., RF Patent no. 2319973, *Buyll. Izobret.*, no. 8 (2008).

Статья поступила в редакцию 01.12.2020; принята к публикации 26.02.2021.

Testing&Control

26–28 октября 2021
МВЦ «Крокус Экспо»

Самая крупная в России международная
выставка испытательного и контрольно-
измерительного оборудования



www.testing-control.ru



Измерительное
и метрологическое
оборудование



Оборудование
для лабораторного
контроля



Испытательное
оборудование



Оборудование
для неразрушающего
контроля и технической
диагностики



Производственный
контроль и машинное
зрение



Системы диагностики
и мониторинга

На правах рекламы

Подробности на сайте
www.testing-control.ru

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (495) 252 11 07
control@mvk.ru

ПОДПИСКА – 2021

- на ежемесячный научно-технический журнал
«Измерительная техника»
(печатное издание и электронная копия)
- на журнал «Метрология»
(периодичность выхода 4 раза в год)
- ▶ онлайн на сайтах подписных агентств
- ▶ в редакции

Подписка через Интернет

ГК «Урал-Пресс»

«Измерительная техника»	«Метрология»
38168 (печатное издание)	013316
013315 (электронная копия)	(электронная копия)

www.ural-press.ru

☎ +7 (495) 789-86-36; +7 (499) 700-05-07

Агентство по распространению зарубежных изданий

www.arzi.ru

☎ +7 (495) 680-89-87; +7 (495) 631-62-55

✉ secret@arzi.ru

Агентство «Книга-Сервис»

- интернет-каталог «Пресса по подписке» www.akc.ru
- объединённый каталог «Пресса России» www.pressa-rf.ru

☎ +7 (495) 631-62-54

✉ podpiska@pressa-rf.ru

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU www.elibrary.ru

Электронно-библиотечная система «РУКОНТ» www.lib.rucont.ru

Подписка в редакции
на номера текущего года и архивные номера 2016–2020 гг.

- ▶ по телефону +7 (495) 430-28-02
- ▶ по электронной почте kersova@vniims.ru
- ▶ на сайтах www.vniims.ru, www.izmt.ru

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

☎ +7 (495) 781-48-70

✉ izmt@vniims.ru

www.izmt.ru