

**ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА
2020
№5**



организаторы



МИНПРОТОРГ
РОССИИ



РОССТАНДАРТ

Федеральное агентство
по техническому регулированию
и метрологии

Крокус Экспо
Международный выставочный центр



УВАЖАЕМЫЕ УЧАСТНИКИ МЕЖДУНАРОДНОГО ИННОВАЦИОННОГО ФОРУМА И ВЫСТАВКИ «МЕТРОЛЭКСПО»!

*Руководитель Федерального
агентства по техническому
регулированию и метрологии
Алексей Абрамов*

В условиях сложной эпидемиологической ситуации в мире и в России Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии совместно с Министерством промышленности и торговли Российской Федерации принято решение о переносе сроков проведения Международного инновационного форума и выставки «МетролЭкспо».

В 2020 г. организаторы выставки провели большую работу по созданию нового формата форума и выставки «МетролЭкспо». Удалось привлечь представителей ведущих предприятий и компаний в области приборостроения и измерительной техники, госкорпораций, российских и международных экспертов в области метрологии, аккредитации, подготовки кадров.

В свою очередь, система Росстандарта – метрологические институты и региональные центры – подготовила уникальный концепт общей выставочной экспозиции, собрав на ней лучшие образцы и проекты для метрологического обеспечения ведущих отраслей экономики.

Вместе с тем, ваше здоровье и спокойствие ваших близких – наша главная ценность. Поэтому предлагаю сохранить этот задел, чтобы провести запланированную встречу на площадке «МетролЭкспо» в мае 2021 г.



ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА 2020

№ 5 май

Ежемесячный
научно-технический
журнал

Основан в 1939 г.

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»

ФГУП «Российский
научно-технический центр
информации по стандартизации,
метрологии и оценке соответствия»

Метрологическая академия

СОДЕРЖАНИЕ

Всемирный день метрологии – 20 мая 2020 года

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

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТРОЛОГИИ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В. В. Жмайлов, А. Ю. Кожевников, О. А. Корovina. Применение комплектных
способов поверки измерительных каналов на атомных электростанциях 4

НАНОМЕТРОЛОГИЯ

А. С. Кравчук, А. И. Кравчук. Достаточное условие надёжности измерений
рельефа поверхности образца методом атомно-силовой микроскопии 11

ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ И ЧАСТОТЫ

С. Л. Пасынок, И. В. Безменов, И. Ю. Игнатенко, Е. Н. Цыба, В. Е. Жаров.
Совершенствование методов и средств Главного метрологического центра
Государственной службы времени, частоты и определения параметров
вращения Земли 16

Д. Г. Калинов, В. И. Римлянд. Предварительная калибровка фазового интер-
полятора прецизионного измерителя временных интервалов 22

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Г. Н. Ахобадзе. Структурные методы повышения точности измерений расхода
веществ в трубопроводах 30

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. В. Давыдов, Н. С. Мязин, С. С. Макеев, В. И. Дудкин. Метод контроля
времени продольной релаксации текущей жидкости во всём диапазоне
измерения расхода 36

Ю. Л. Николаев, Э. Ф. Ахметшина, А. А. Саморуков, А. В. Чернова. Оценка
соотношения информативного и фоновых сигналов при регистрации
магнитных полей поверхностных дефектов магнитоизмерительными пре-
образователями 43

Ю. Г. Астраханцев, Н. А. Белоглазова. Алгоритмическая коррекция инстру-
ментальных погрешностей магнитометра 50

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

В. В. Савченко, А. В. Савченко. Способ обновления голосовых образцов в Единой
биометрической системе в режиме реального времени 58

МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Д. С. Семенов, В. А. Яцеев, Е. С. Ахмад, Ю. А. Васильев, К. А. Сергунова,
А. В. Петряйкин. Высокоточная система измерений температуры для магнитно-
резонансной томографии 66

ИНФОРМАЦИЯ 72

Главный редактор
С. С. Голубев

Редакционная коллегия:

В. И. Белоцерковский
С. И. Донченко
И. В. Емельянова
(зам. гл. редактора)
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

**Журнал переводится
на английский язык
под названием
«Measurement
Techniques»
издательством Springer
www.springer.com/11018**

Корректор *М. В. Бучная*
Компьютерная вёрстка *С. А. Мамедова*

Сдано в набор: 23.04.2020.
Подписано в печать: 27.05.2020.
Формат 60х90 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. п.л. 9,0. Уч.-изд. л. 11. Тир. 250 экз. Зак. 20-34к.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-21572
от 15.07.2005.

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

Редакция не несёт ответственности за
содержание рекламных материалов. Точка зрения
редакции может не совпадать с мнением авторов.

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

© Измерительная техника, 2020

World Metrology Day – 20 May 2020

Message from M. Milton, Director of the BIPM and E. Donnellan, Director of the BIML3

GENERAL PROBLEMS OF METROLOGY AND MEASUREMENT TECHNIQUES

V. V. Zhmaylov, A. Iu. Kozhenikov, O. A. Korovina. The application of the nuclear
power plant measuring channels complete verification.....4

NANOMETROLOGY

A. S. Kravchuk, A. I. Kravchuk. Sufficient condition for reliability measurement of sam-
ple geometry by atomic force microscopy.....11

TIME AND FREQUENCY MEASUREMENTS

S. L. Pasynok, I. V. Bezmenov, I. Yu. Ignatenko, E. N. Tcyba, V. E. Zharov. Impro-
ving methods and facilities of Earth's orientation parameters evaluation in Main
metrological center of State service for time, frequency and Earth's orientation
parameters evaluation.....16

D. G. Kalinov, V. I. Rimlyand. Pre-calibration of the phase interpolator of a precision
time interval meter.....22

MECHANICAL MEASUREMENT

G. N. Akhobadze. Structured methods for improving flow measurement accuracy
in pipelines30

ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS

V. V. Davydov, N. S. Myazin, S. S. Makeev, V. I. Dudkin. The new method for longi-
tudinal relaxation time control of flowing liquid in the entire range of its expenditure
measuring36

Yu. L. Nikolaev, E. F. Akhmetshina, A. A. Samorukov, A. V. Chernova. Estimation
of informative and background signals ratio in the registration of magnetic fields
of surface defects by magnetic measuring transducers.....43

Yu. G. Astrakhantsev, N. A. Beloglazova. Improving the measurement accuracy
of magnetometer algorithmic correction of its instrumental errors50

ACOUSTIC MEASUREMENTS

V. V. Savchenko, A. V. Savchenko. Method of real-time updating for voice templates in
the Unified Biometric System58

MEDICAL AND BIOLOGICAL MEASUREMENTS

D. S. Semenov, E. S. Akhmad, V. A. Yatseev, Yu. A. Vasilev, K. A. Sergunova,
A. V. Petraikin. Highly sensitive magnetic resonance compatible temperature
measurement system.....66

INFORMATION.....72

Приветствие

Директоров МБМВ и МБЗМ



Мартин Милтон
Директор МБМВ



Энтони Доннеллан
Директор МБЗМ

Измерения для глобальной торговли

Задумывались ли вы над тем, сколько товаров и услуг продаётся во всём мире, или подсчитывали ли вы, сколько энергии в виде электричества или газа проходит через границы государств? Вы можете не знать точного количества и принимать результаты измерений без доказательств, полагаясь на то, что делают производители, транспортная система и правительства для обеспечения равноправия и безопасности при торговле и транспортировке товаров.

Однако созданы такие международные системы, которые обеспечивают необходимую гарантию и уверенность в точности измерений и являются надёжной основой глобальной торговли.

По данным Всемирной торговой организации (ВТО)¹ в 2018 г. объём мировой торговли составил рекордную сумму – 19,67 трлн долларов США. Учитывая тот факт, что цены на значительную часть продукции мировой торговли установлены с использованием узаконенных единиц измерений, становится ясно, что метрология играет огромную и поистине решающую роль в глобальной торговле.

Правительства для защиты производителей и потребителей принимают технические регламенты и стандарты на национальном и международном уровнях. По оценкам Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) приблизительно в 80 % глобальной торговли используются стандарты или технические регламенты. Необходимо иметь надёжную систему измерений, чтобы применение стандартов и технических регламентов не создавало бы излишних технических барьеров в торговле (ТБТ), ведущих к дополнительным затратам, не препятствовало свободному потоку товаров, не вызывало необходимость проведения повторных испытаний.

Уверенность в оценке соответствия установленным требованиям сокращает затраты и повышает доверие предпринимателей и потребителей. Это поддерживается прочной и эффективной всемирной метрологической системой.

Мы все не можем обойтись без поставок товаров либо из ближайшего магазина, либо из страны на другом конце света. Точные измерения гарантируют, что нужные товары и услуги будут доставлены своевременно и в сохранности.

Мы, как директора Международного бюро законодательной метрологии (МБЗМ) и Международного бюро мер и весов (МБМВ), активно работаем для повышения важной роли, которую измерения играют в глобальной торговле, чтобы обеспечить справедливость, доверие и защиту интересов как производителя, так и потребителя.

¹ https://www.wto.org/english/res_e/statis_e/wts2019_e/wts19_toc_e.htm

Применение комплектных способов поверки измерительных каналов на атомных электростанциях

В. В. Жмайлов, А. Ю. Кожевников, О. А. Коровина

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва, Российская Федерация, e-mail: v.zhmaylov@gmail.com, andre980@list.ru, oly_korovina@mail.ru

Показана необходимость разработки дополнительных нормативных документов для повышения экономической эффективности эксплуатации атомных электростанций и снижения трудоёмкости поверки их измерительных каналов. Предложено регламентировать положения о возможности поверять измерительные каналы атомных электростанций покомпонентно или комплектно основными и альтернативными способами в зависимости от требований к достоверности результатов поверки. В качестве альтернативных способов комплектной поверки выделены равноточный, перекрёстный и комбинированный способы. Обозначены основные задачи, которые требуется решить для разработки нормативных документов, представлены требования к их основным положениям. Показано, что в разрабатываемых нормативных документах регламентирование положений об использовании на атомных электростанциях способов комплектной поверки измерительных каналов позволит контролировать погрешность канала как единого средства измерений без демонтажа компонентов, сократить время, выделяемое на поверку в период останова энергоблока и сохранить достоверность результатов поверки измерительного канала на приемлемом уровне. Приведён пример методики оценки достоверности способов комплектной поверки, как одного из важнейших критериев выбора способа поверки.

Ключевые слова: атомные электростанции, поверка измерительных каналов, комплектная поверка, основной способ комплектной поверки, альтернативные способы комплектной поверки, перекрёстный способ комплектной поверки, равноточный способ комплектной поверки, комбинированный способ комплектной поверки, достоверность результатов поверки, трудоёмкость поверки.

Введение. Согласно действующим нормативным документам на атомных электростанциях (АЭС) все измерительные системы и каналы должны являться средствами измерений (СИ) утверждённого типа и подвергаться поверке либо комплектно, как единое законченное средство измерений, либо покомпонентно (Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» с изменениями на 13.07.2015; ГОСТ Р 8.596-2002 ГСИ «Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения»; Приказ государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» от 31 октября 2013 года № 1/10-НПА «Об утверждении метрологических требований к измерениям, эталонам единиц величин, стандартным образцам, средствам измерений, их составным частям, программному обеспечению, методикам (методам) измерений, применяемым в области использования атомной энергии») [1, 2].

В настоящее время измерительные каналы на АЭС поверяют покомпонентно во время останова энергоблока, сталкиваясь со следующими проблемами. Во-первых, покомпонентная поверка измерительных каналов обладает большой трудоёмкостью, так как необходимо демонтировать и поверить каждый измерительный компонент во всех режимах, диапазонах и точках, предусмотренных

методикой поверки. Системы АЭС содержат тысячи измерительных каналов, и отведённого времени часто оказывается недостаточно для их поверки покомпонентным способом.

Во-вторых, для демонтажа первичных преобразователей первого контура АЭС требуется работа персонала в условиях повышенного радиационного фона и прочих вредных условиях.

В-третьих, при покомпонентной поверке не учитывается влияние на метрологические характеристики линий связи и реальных условий эксплуатации измерительных каналов, что снижает достоверность результатов поверки.

Чтобы устранить или минимизировать указанные проблемы, покомпонентную поверку необходимо заменить комплектной.

Методы комплектной поверки. При проведении комплектной поверки измерительных каналов АЭС предлагается задействовать несколько каналов, измеряющих один и тот же технологический параметр, а также использовать результаты наблюдения за метрологическими характеристиками измерительных каналов в процессе эксплуатации и учитывать особенности режимов работы объекта управления. В современных нормативных документах

отсутствуют положения, регламентирующие применение таких подходов. Поэтому для упрощения метрологического обеспечения АЭС требуется разработка новых нормативных документов, в которых будут регламентированы покомпонентная и комплектная поверки измерительных каналов с описанием методик оценки достоверности результатов поверки, межповерочного интервала, трудоёмкости поверки и пр. Кроме того, должны быть регламентированы основной и альтернативные способы комплектной поверки измерительных каналов на АЭС. Рассмотрим подробнее эти способы.

Основной способ комплектной поверки измерительных каналов предполагает определение погрешности поверяемого канала с помощью канала эталонного, выбранного в соответствии с поверочной схемой и контролирующего тот же параметр, что и поверяемый измерительный канал [3, 4]. В отличие от покомпонентной поверки погрешность поверяемого канала контролируется для диапазонов и режимов не отдельных компонентов, а измерительного канала в целом. Погрешность измерительного канала можно проконтролировать в точках шкалы, соответствующих текущему состоянию технологического процесса на месте эксплуатации. В итоге трудоёмкость поверки значительно сокращается.

Помимо основного способа комплектной поверки измерительных каналов можно выделить альтернативные способы, подходы к реализации которых описаны в работах [3–7] и в ГОСТ Р МЭК 62385-2012 «Атомные станции. Контроль и управление, важные для безопасности. Методы оценки рабочих характеристик измерительных каналов систем безопасности». К альтернативным способам комплектной поверки можно отнести равноточный, перекрёстный и комбинированный. Равноточный способ предполагает определение погрешности поверяемых измерительных каналов с помощью уже поверенного канала, имеющего равную с ними точность. Перекрёстный способ предполагает определение погрешности поверяемых каналов сравнением их показаний со средним для группы значением. При комбинированном способе погрешности поверяемых каналов могут определяться с помощью нескольких способов комплектной поверки, например перекрёстного и равноточного или перекрёстного и основного комплектных способов и т. д.

Согласно ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные» многие измерительные каналы АЭС относятся к классу адаптивных и интеллектуальных измерительных систем, в которых заложены различные способы контроля погрешностей каналов. Использование этих способов при поверке измерительных каналов позволит повысить достоверность результатов поверки, поможет уточнить длительность межповерочного интервала, а также сохранить возможность поверки для случаев, когда каналы невозможно или нецелесообразно поверить покомпонентно или с помощью основного комплектного способа. Однако в действующих нормативных документах, в том числе в поверочных схемах, отсутствуют положения, регулирующие внедрение

способов комплектной поверки измерительных каналов на АЭС. Для разработки этих положений требуется решение следующих задач.

1. Необходимо сформировать требования к трудоёмкости поверки и достоверности её результатов в зависимости от назначения и особенностей применения измерительных каналов, а также разработать методики их оценки для покомпонентного и комплектных способов поверки.

2. Надлежит выявить группы измерительных каналов и режимы технологических процессов, для которых возможно проведение комплектной поверки каналов. При этом надо учитывать, что данные группы и режимы индивидуальны для каждого объекта и требуют изучения систем конкретной АЭС.

3. Следует учитывать расхождения показаний измерительных каналов, обусловленные неидентичностью точек их подключения к объекту контроля. Так, например, значения температуры теплоносителя в главном циркуляционном трубопроводе, выдаваемые несколькими измерительными каналами, могут различаться из-за неравномерности подогрева теплоносителя на тепловыделяющих сборках реактора. Чтобы предусмотреть подобные расхождения показаний измерительных каналов, в работах [3, 4] предложен ввод поправок, для оценки значений которых можно использовать известные модели функциональных зависимостей показаний измерительных каналов.

4. Для перекрёстного способа поверки нужно принять во внимание влияние на контролируемую погрешность совместного дрейфа, т. е. дрейфа показаний всех измерительных каналов в одну сторону [8, 9].

Одной из важнейших задач при обосновании выбора способа комплектной поверки измерительных каналов АЭС является оценка достоверности результатов поверки и выбор её минимально допустимого уровня [10–16]. Достоверность результатов может характеризоваться рисками ошибочного признания дефектного канала годным (необнаруженный отказ – ошибка 2-го рода), а годного канала – дефектным (ложный отказ – ошибка 1-го рода) согласно работам [15, 16] и МИ 187-86 ГСИ «Средства измерений. Критерии достоверности и параметры методик поверки», МИ 187-86 ГСИ «Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки», МИ 1317-2004 ГСИ «Рекомендация. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров». Достоверность тем больше, чем выше точность эталонных значений, применяемых для контроля погрешности поверяемого измерительного канала. С точки зрения безопасности АЭС наибольший интерес представляет риск необнаруженного отказа. Поэтому в случаях, требующих его полного исключения, при поверке следует использовать зону безусловной годности. В этом случае измерительный канал будет признан годным, только если контролируемое значение погрешности не превосходит разности своего предельного значения и предельного значения погрешности эталона [17]. В других случаях риск необнаруженного

отказа будет ненулевым и его значение необходимо оценивать. Обеспечить нулевой риск необнаруженного отказа можно только при комплектной проверке измерительного канала основным способом или при его покомпонентной проверке с учётом влияния на погрешность измерительного канала всех линий связи и прочих факторов, при известных пределах погрешностей поверяемых и эталонных СИ. Поэтому для измерительных каналов, требующих нулевого риска необнаруженного отказа, должно быть регламентировано применение только этих двух способов проверки.

Методика оценки достоверности результатов проверки измерительных каналов в виде рисков необнаруженного и ложного отказов описана в работах [15, 16]. Риски необнаруженного и ложного отказов возникают из-за того, что погрешность ξ поверяемого канала определяют неточно из-за погрешности Δ эталонного значения, с которым сравниваются показания поверяемого канала. Так, для основного способа комплектной проверки Δ – это погрешность показаний эталонного измерительного канала. Для равноточного способа Δ – это погрешность показаний, с которыми сравниваются показания поверяемого измерительного канала. Для перекрёстного способа Δ – это погрешность среднего значения показаний группы измерительных каналов. При необходимости в величину Δ могут быть включены погрешности, вносимые совместным дрейфом измерительных каналов, неодинаковостью значений контролируемого параметра технологического процесса и т. д.

Для погрешности ξ достоверны следующие условия:

$$\left. \begin{array}{l} \text{если } \xi \in [\alpha; \beta], \text{ то измерительный канал годный;} \\ \text{если } \xi \notin [\alpha; \beta], \text{ то измерительный канал дефектный;} \end{array} \right\} (1)$$

где $[\alpha; \beta]$ – интервал допустимых значений ξ .

Однако из-за погрешности эталонного значения вместо точного значения ξ получается его оценка x :

$$x = \xi + \Delta. \quad (2)$$

Далее x сравнивается с интервалом допустимых значений $[X_H; X_B]$, который может быть смещён (сужен или расширен) относительно интервала $[\alpha; \beta]$. Если $x \in [X_H; X_B]$, то измерительный канал признаётся годным, а если $x \notin [X_H; X_B]$, то дефектным. Смещение интервала допустимых значений x позволяет снизить один из рисков. Если интервал сужен, то снижается риск необнаруженного отказа, а если расширен, то ложного. При контроле погрешности измерительного канала в одной или m точках шкалы риски оцениваются как [15, 16]:

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{л}} = 1 - \int_{X_H}^{X_B} f_{x\Gamma}(x) dx; \\ R_{\text{нб}} = \int_{X_H}^{X_B} f_{x\Delta}(x) dx; \end{array} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{л}m} = 1 - (1 - R_{\text{л}})^m; \\ R_{\text{нб}m} = R_{\text{нб}}^m, \end{array} \right\} (4)$$

где $R_{\text{л}}$, $R_{\text{нб}}$ – соответственно риски ложного и необнаруженного отказов при контроле погрешности измерительного канала в одной точке; $R_{\text{л}m}$, $R_{\text{нб}m}$ – соответственно риски ложного и необнаруженного отказов при контроле погрешности в m точках шкалы измерительного канала; $f_{x\Gamma}(x)$, $f_{x\Delta}(x)$ – плотности вероятности x для годных и дефектных измерительных каналов соответственно.

Формулы для расчёта плотностей вероятности имеют вид

$$\left. \begin{array}{l} f_{x\Gamma}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\xi\Gamma}(\xi) f_{\Delta}(x - \xi) d\xi; \\ f_{x\Delta}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\xi\Delta}(\xi) f_{\Delta}(x - \xi) d\xi; \end{array} \right\} (5)$$

$$\left. \begin{array}{l} f_{\xi\Gamma}(\xi) = f(\xi) / \int_{\alpha}^{\beta} f(\xi) d\xi, \text{ при } \alpha \leq \xi \leq \beta; \\ f_{\xi\Gamma}(\xi) = 0, \text{ при других значениях } \xi; \end{array} \right\} (6)$$

$$\left. \begin{array}{l} f_{\xi\Delta}(\xi) = f(\xi) / \left(1 - \int_{\alpha}^{\beta} f(\xi) d\xi \right), \text{ при } \xi < \alpha \text{ или } \xi > \beta; \\ f_{\xi\Delta}(\xi) = 0, \text{ при других значениях } \xi, \end{array} \right\} (7)$$

где $f_{\Delta}(\dots)$ – функция плотности вероятности величины Δ , применённая к аргументу в скобках; $f_{\xi\Gamma}(\xi)$, $f_{\xi\Delta}(\xi)$ – функции плотности вероятности величины ξ для годных и дефектных измерительных каналов соответственно; $f(\xi)$ – функция плотности вероятности величины ξ .

Методика (1)–(7) оценки рисков предполагает, что во всех контролируемых точках шкалы измерительного канала справедливы следующие утверждения: значения ξ , Δ независимы; распределения ξ , Δ известны и не изменяются от точки к точке; интервалы $[\alpha; \beta]$ и $[X_H; X_B]$ не изменяются от точки к точке [15, 16].

Достоверность основного, равноточного и перекрёстного способов комплектной проверки в каждой контролируемой точке шкалы измерительного канала можно оценить из выражений (3). Достоверность комбинированного способа оценивается следующим образом. Сначала по выражениям (3) рассчитывается достоверность каждого способа, входящего в комбинацию, а затем вычисляется достоверность всего комбинированного способа:

$$\left. \begin{array}{l} R_{\text{л}} = 1 - (1 - R_{\text{л}1})(1 - R_{\text{л}2}); \\ R_{\text{нб}} = R_{\text{нб}1} R_{\text{нб}2}, \end{array} \right\} (8)$$

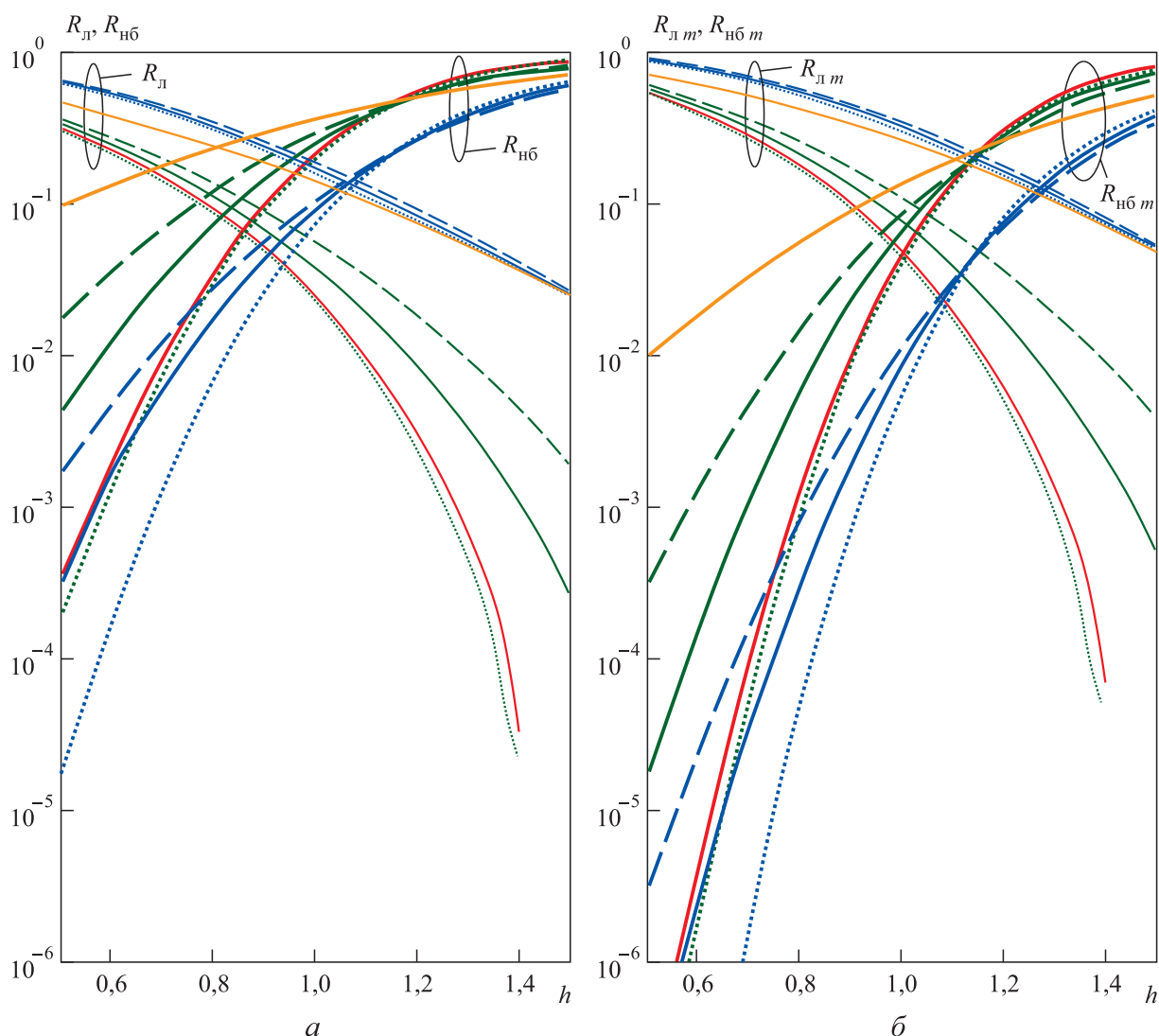
где $R_{\text{л}1}$, $R_{\text{л}2}$, $R_{\text{нб}1}$, $R_{\text{нб}2}$ – соответственно риски ложного и необнаруженного отказов для каждого из двух способов проверки, составляющих комбинированный способ комплектной проверки измерительного канала.

Поверки измерительного канала, составляющие комбинированный способ, считаются независимыми событиями.

Полученные результаты и их анализ. Приведём численные примеры оценки достоверности результатов поверки по представленной методике при контроле погрешности измерительного канала в одной и двух точках шкалы для

способов комплектной поверки: основного, равноточного, перекрестного и комбинированного, сочетающего в себе равноточный и перекрестный способы. Для этого предположим справедливость следующих утверждений:

погрешности ξ , Δ распределены нормально [18] и характеризуются средними квадратическими отклонениями σ_ξ , σ_Δ соответственно;



Зависимости рисков необнаруженного R_{NB} (полужирные линии) и ложного R_L (основные линии) отказов от коэффициента h смещения интервала для различных способов комплектной поверки измерительного канала при контроле его погрешностей в одной (а) и двух точках (б):

— риски при основном, равноточном, перекрестном, и комбинированном (сочетающем равноточный и перекрестный) способах поверки соответственно; пунктирные линии и точечные линии — соответственно $n=3$, 10

Undetected R_{NB} (semifat lines) and false R_L (main lines) failure risk dependencies on h for measurement channel complete verification methods: for one point measurement channel error control (a) and for two point control (b):

— are respectively risks for the basic, uniformly precise, cross, combined (comprises of the uniformly precise and cross methods) complete verification method; dashed lines and lines from points correspond to $n=3$, 10 values

Оценки рисков для основного и комбинированного способов комплектной поверки

Способ комплектной поверки	$R_{нб}$	$R_{нб\ m}$	h	n	K_T
Основной	0,210 0,035	0,042 $1,2 \cdot 10^{-3}$	1,0 0,8	– –	3 3
Комбинированный	0,110 $6,9 \cdot 10^{-3}$	0,011 $4,8 \cdot 10^{-5}$	1,0 0,8	3 10	– –

коэффициент точности $K_T = \sigma_\xi / \sigma_\Delta$ имеет следующие значения: $K_T = 3$ для основного способа согласно требованиям МИ 3592-2017 ГСИ «Методы определения метрологических характеристик средств измерений применяемых в области использования атомной энергии»; $K_T = 1$ для равноточного способа; $K_T = \sqrt{n}$ для перекрестного способа, где n – количество измерительных каналов в группе, по которой происходит усреднение показаний (пусть $n=3; 5; 10$);

интервал допустимых значений x определяется как

$$[X_H = h\alpha; X_B = h\beta],$$

где h – коэффициент смещения интервала, принимающий значения от 0,5 до 1,5; $\alpha = -\beta = -1,96\sigma_\xi$;

совместный дрейф измерительного канала, неодинаковость значений контролируемого параметра технологического процесса и пр. не влияют на погрешность Δ .

Применив выражения (3), (4), (8) получим для способов комплектной поверки зависимости рисков обнаруженного и ложного отказов от h , показанные на рисунке.

В таблице представлены оценённые значения риска обнаруженного отказа $R_{нб}$ в одной точке и $R_{нб\ m}$ в двух точках для основного и комбинированного способов комплектной поверки для некоторых значений h , n , и K_T .

Полученные значения риска обнаруженного отказа показывают, что при определённых условиях альтернативные способы комплектной поверки измерительных каналов могут обеспечивать достоверность результатов поверки, сравнимую с достоверностью основного способа.

Заключение. Использование при поверке измерительных каналов основного и альтернативных способов комплектной поверки поможет существенно сократить трудоёмкость работ при сохранении на приемлемом уровне достоверности результатов поверки. Для легитимного внедрения на АЭС способов комплектной поверки измерительных каналов необходима разработка дополнительных нормативных документов, содержащих следующие положения:

регламентирование проведения покомпонентной и комплектной поверок измерительных каналов с описанием методик оценки достоверности результатов поверки, межповерочного интервала, трудоёмкости поверки и пр. Цепи метрологической прослеживаемости измерительных

каналов АЭС должны соответствовать либо действующим поверочным схемам, либо предложенным способам поверки;

регламентирование применения основного и альтернативных способов комплектной поверки измерительных каналов на АЭС;

указания о допустимости выбора способа комплектной поверки измерительных каналов в зависимости от особенностей их построения, возможности реализации эталонного измерительного канала, условий его использования, режимов работы, существования резервированных каналов, совместного дрейфа показаний резервированных каналов и пр.;

указания о выборе приемлемого уровня достоверности результатов поверки измерительных каналов в зависимости от назначения и других особенностей их применения. В том числе должны быть перечислены случаи, где при поверке не допустим ненулевой риск обнаруженного отказа измерительного канала. Для этих случаев в нормативных документах надо указывать, что поверять измерительные каналы допускается либо комплектно основным способом, либо покомпонентно с учётом влияния на погрешность канала всех линий связи и прочих факторов, при известных пределах погрешностей поверяемых и эталонных СИ;

регламентирование требований к поверке адаптивных и интеллектуальных измерительных систем и каналов для сохранения необходимого уровня адаптации;

регламентирование возможности проведения поверки измерительных каналов по результатам контроля их метрологических характеристик в процессе эксплуатации.

Разработка нормативных документов позволит широко использовать на АЭС способы комплектной поверки измерительных каналов, позволяющие контролировать погрешности канала как единого СИ без демонтажа его компонентов и выделения на поверку в период останова энергоблока длительных промежутков времени, сохраняя при этом достоверность результатов поверки на приемлемом уровне. Применение комплектных способов поверки измерительных каналов позволит существенно сократить трудоёмкость работ, повысив экономическую эффективность эксплуатации АЭС.

Список литературы

1. Аркадов Г. В., Павелко В. И., Финкель Б. М. Системы диагностирования ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2010. 391 с.
2. Андрущенко С. А., Васильев Б. Ю., Косоуров К. Б., Семчев Ю. М., Кучумов А. Ю., Украинцев Ф. В., Фаворов Б. Ю. ВВЭР-1200. Эволюция классики. Физические основы эксплуатации, системы и элементы, ядерное топливо, безопасность. М.: Логос, 2019. 672 с.
3. Жмайлов В. В. Использование перекрёстной калибровки для оптимизации поверки измерительных каналов АЭС // Технологии электромагнитной совместимости. 2019. № 4 (71). С. 50–61.
4. Жмайлов В. В. Сокращение необходимого объёма работ при проведении поверки оборудования АЭС.

Метод прекрестной поверки измерительных каналов АЭС // Сборник докладов XIII научно-технической конференции «ВНИИА-2019» 11–29 марта 2019 г. М.: ФГУП «ВНИИА», 2019. С. 79–92.

5. Хашемиан Н. М. Техническое обслуживание измерительных устройств на атомных электростанциях: Пер. с англ. М.: БИНОМ, 2012. 350 с.

6. Hashemian H. M., *On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants. Phase II. Final Report*, Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 1995, 326 p. DOI: 10.2172/137413

7. Hashemian H. M., Mitchell D. W., Peterson K. M., Shell C. S., Antonescu C. E., *Validation of Smart Sensor Technologies for Instrument Calibration Reduction in Nuclear Power Plants*, Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 1993, 154 p. DOI: 10.2172/6682437

8. Hashemian H. M., Beerly D. D., Mitchell D. W., Peterson K. M., *Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors*, Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 2014, 181 p.

9. Hashemian H. M., *The 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics. Operations and Safety*, Taipei, Taiwan, April 6–8, 1994. Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 1994, pp. 32-C-1–32-C-6.

10. Рубичев Н. А. Измерительные информационные системы. М.: Дрофа, 2010. 334 с.

11. Данилевич С. Б. Достоверность результатов многопараметрического измерительного контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 171–179.

12. Данилевич С. Б., Колесников С. С. Достоверность продукции и достоверность результатов контроля // Компетентность. 2011. № 2. С. 20–22.

13. Кутяйкин В. Г., Макаров Н. А. Метрологическое обеспечение средств измерений, допускового контроля и индикаторов // Компетентность. 2013. № 7. С. 38–41.

14. Давыдов П. С. Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем. М.: Радио и связь, 1988. 256 с.

15. Фрумкин В. Д., Рубичев Н. А. Теория вероятностей и статистика в метрологии и измерительной технике. М.: Машиностроение, 1987. 168 с.

16. Коровина О. А. Оценка рисков изготовителя и заказчика при контроле погрешностей измерительных устройств в одной или нескольких точках // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 14–17. DOI: 1032446/0368-1025it.2018-5-14-17

17. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Л.: Энергия, 1978. 262 с.

18. Рябева Е. В. Статистические методы обработки результатов измерений (с примерами в среде Mathcad). Учебное пособие. М.: Буки Веди, 2019. 396 с.

References

1. Arkadov G. V., Pavelko V. I., Finkel' B. M., *Sistemy diagnostirovaniya VVEHR*, Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 2010, 391 p. (in Russian).

2. Andrushechko S. A., Vasil'ev B. Yu., Kosourov K. B., Semchekov Yu. M., Kuchumov A. Yu., Ukraintsev F. V., Favonov B. Yu., *VVEHR-1200. Ehvolutsiya klassiki. Fizicheskie osnovy ehkspluatatsii, sistemy i ehlementy, yadernoe toplivo, bezopasnost'*, Moscow, Logos, 2019, 672 p. (in Russian).

3. Zhmailov V. V., *Tekhnologii ehlektromagnitnoi sovместимости*, 2019, no. 4 (71), pp. 50–61 (in Russian).

4. Zhmailov V. V., *Sokrashchenie neobhodimogo ob'yoma rabot pri provedenii poverki oborudovaniya AES. Metod prekrestnoy poverki izmeritel'nykh kanalov AES*, Proceedings of the 13th Scientific and Technical Conference "VNIIA-2019", Moscow, March, 11–29, 2019, Moscow, FSUE "VNIIA", 2019, pp. 79–92.

5. Hashemian H. M., *Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. DOI: 10.1007/978-3-540-33704-1

6. Hashemian H. M., *On-Line Testing of Calibration of Process Instrumentation Channels in Nuclear Power Plants. Phase II. Final Report*, Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 1995, 326 p. DOI: 10.2172/137413

7. Hashemian H. M., Mitchell D. W., Peterson K. M., Shell C. S., Antonescu C. E., *Validation of Smart Sensor Technologies for Instrument Calibration Reduction in Nuclear Power Plants*, Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 1993, 154 p. DOI: 10.2172/6682437

8. Hashemian H. M., Beerly D. D., Mitchell D. W., Peterson K. M., *Aging of Nuclear Plant Resistance Temperature Detectors*, Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 2014, 181 p.

9. Hashemian H. M., *The 4th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics. Operations and Safety*, Taipei, Taiwan, April 6–8, 1994. Knoxville, Analysis and Measurement Services Corporation, 1994, pp. 32-C-1–32-C-6.

10. Rubichev N. A., *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy*, Moscow, Drofa Publ., 2010, 334 p. (in Russian).

11. Danilevich S. B., *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, 2015, no. 4, pp. 171–179 (in Russian).

12. Danilevich S. B., Kolesnikov S. S., *Kompetentnost'*, 2011, no. 2, pp. 20–22 (in Russian).

13. Kutyaiкин V. G., Makarov N. A., *Kompetentnost'*, 2013, no. 7, pp. 38–41 (in Russian).

14. Davydov P. S., *Tekhnicheskaya diagnostika radioehlektronnykh ustroystv i system*, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1988, 256 p. (in Russian).

15. Frumkin V. D., Rubichev N. A., *Teoriya veroyatnostei i statistika v metrologii i izmeritel'noi tekhnike*, Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 168 p. (in Russian).

16. Korovina O. A., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61 (5), pp. 434–439. DOI 10.1007/s11018-018-1448-8

17. Rabinovich S. G., *Pogreshnosti izmerenii*, Leningrad, Ehnergiya Publ., 1978, 262 p. (in Russian).

18. Ryabeва E. V., *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov izmerenii (s primerami v srede Mathcad)*. Uchebnoe posobie, Moscow, Buki Vedi Publ., 2019, 396 p. (in Russian).

Дата поступления: 28.01.2020.

Дата принятия: 18.02.2020.

The application of the nuclear power plant measuring channels complete verification

Vadim V. Zhmaylov, Andrew Iu. Kozhenikov, Olga A. Korovina

All-Russian Research Institute of Automatics (FSUE "VNIIA"),

Moscow, Russian Federation, e-mail: v.zhmaylov@gmail.com, andre980@list.ru, oly_korovina@mail.ru

It's suggested to develop the additional NPP measuring channels verification regulations in order to reduce verification labour-intensiveness and increase economic NPP operation efficiency. This regulations should afford an opportunity for componentwise verification and for basic and alternative complete verification of the NPP measuring channels depending on the verification reliability requirements. The uniformly precise, cross and combined methods are identified as alternative methods of complete verification. This article proposes the main regulations development problems and presents requirements for the basic regulations provisions. It's emphasized that the developed regulations of the provisions on the application complete verification of the NPP measuring channels should allow: to control the channel error as a single measuring device without demounting its components; to reduce the verification time allocated during power generating unit hold; to preserve the acceptable level of the measurement channel verification results reliability. An example of the complete verification reliability estimation procedure is given as one of the most important criteria for selecting the verification method.

Key words: nuclear power plant measuring channels verification, complete verification, basic complete verification, alternative complete verification, cross verification, uniformly precise verification, hybrid verification, verification reliability, verification labour-intensiveness.

Достаточное условие надёжности измерений рельефа поверхности образца методом атомно-силовой микроскопии

А. С. Кравчук¹, А. И. Кравчук²

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: ask_belarus@inbox.ru

²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь,
e-mail: anzhelika.kravchuk@gmail.com

Рассмотрены проблемы наноизмерений рельефа поверхности при экспериментальных исследованиях её разрушения под действием внешнего физического процесса, например эрозии поверхности твёрдого тела под действием мощных пучков заряженных частиц в различных внешних условиях, либо в условиях трения двух поверхностей. В настоящее время результаты измерений рельефа поверхности образцов в нанометровом диапазоне имеют вероятностный характер и не могут считаться надёжными и достоверными, если не указаны параметры неровностей поверхности образца и зонда, углы при вершине зонда и наклона кантилевера, а также наилучшее разрешение (наименьший шаг) измерений. Для повышения надёжности измерений рельефа поверхности с помощью атомно-силовых микроскопов необходимо в несколько раз повысить точность изготовления зондов, а также использовать зонды с наименьшим возможным углом при вершине. Кроме того, необходимо внести изменения в конструкцию микроскопов, в частности предусмотреть автоматический поворот предметного стола, чтобы направление оси зонда было близким к нормали к средней плоскости образца, а также геометрически увеличить длину консоли микроскопа, чтобы её основание было расположено за пределами образца. Предложено достаточное условие определения надёжности измерений рельефа поверхности образца методом атомно-силовой микроскопии для относительно небольших углов наклона кантилевера. Создана простая геометрическая модель определения нелокального контакта зонда и шероховатой поверхности. Установлена связь между основными геометрическими параметрами шероховатости поверхности, геометрическими отклонениями зонда, углов наклона кантилевера и наклона боковых граней зонда, а также размерами нелокальной точки вероятного контакта его боковых граней с выступами шероховатости. В качестве достаточного условия надёжности указанных измерений методом атомно-силовой микроскопии принято очевидное требование малости отношения размеров нелокальной точки к расстоянию между соседними нелокальными точками.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, атомно-силовой микроскоп, кантилевер, зонд, четырёхгранная пирамида, критерий надёжности измерений рельефа поверхности образца.

Введение. Несмотря на огромное число публикаций, посвящённых исследованию поверхности с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ), например [1–3], авторы настоящей статьи не нашли в литературе анализа влияния угла при вершине зонда кантилевера и угла наклона зонда, высоты шероховатости образца на надёжность измерений рельефа поверхности образцов в нанодиапазоне, а также описания связи этих параметров с допустимым значением шага измерений – теоретического разрешения микроскопа. Без ограничения общности в настоящей статье рассмотрим многогранный зонд в виде правильной четырёхгранной пирамиды, поскольку с использованием предлагаемого подхода можно экстраполировать представленные далее результаты исследования для зонда любой другой формы.

Отметим, что используемая западными авторами методика доопределения конечного участка ряда Фурье

(коэффициенты которого вычислены по результатам измерений шероховатости образца в конечном числе точек) с помощью определения фрактальности Мандельброта и теоремы Лоренца до бесконечного ряда [4] не выдерживает никакой критики [5]. Фактически эта математически не обоснованная и противоречащая элементарной логике методика только мешает понять всю многогранность проблемы организации достоверных измерений рельефа поверхности образца с помощью АСМ, создавая иллюзию бесконечной точности измерений.

В работах [6, 7] была предложена модель нелокального взаимодействия шероховатых тел. Эту модель можно использовать и для деформируемых тел, однако несмотря на относительную простоту её сложно применять к таким сложным объектам как многогранный зонд кантилевера. Именно негладкость формы поверхности пирамидального

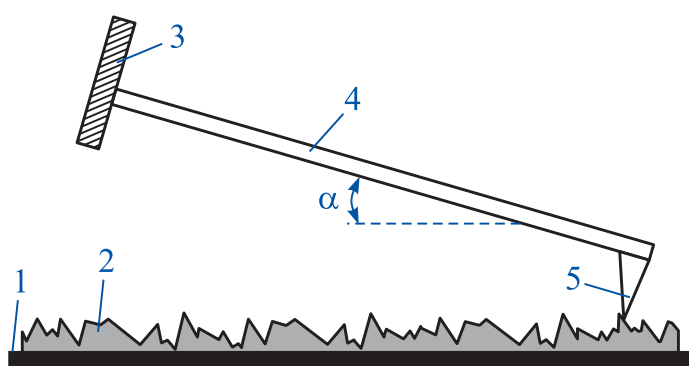


Рис. 1. Схема измерения неровностей с помощью зонда идеальной геометрии атомно-силового микроскопа:

1 – линия (плоскость) впадин; 2 – эквивалентный шероховатый слой; 3 – основание консоли; 4 – консоль микроскопа; 5 – зонд идеальной формы

Fig. 1. Scheme for measuring irregularities using an AFM probe of ideal geometry:

1 – line (plane) of the valleys; 2 – equivalent rough layer; 3 – base; 4 – console; 5 – probe of ideal shape

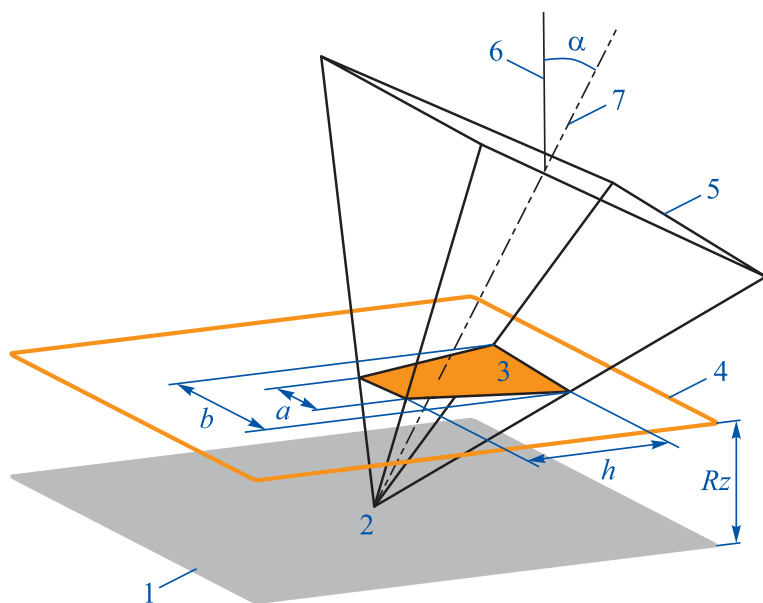


Рис. 2. Нелокальная точка контакта зонда в виде трапеции с шероховатой поверхностью:

1, 4 – плоскости впадин и выступов соответственно; 2 – теоретическая точка касания идеальным зондом идеально ровной плоскости; 3 – нелокальная точка вероятного касания зонда боковой гранью выступов шероховатости; 5 – пирамидальный зонд; 6 – нормаль к плоскости впадин; 7 – ось симметрии пирамидального зонда

Fig. 2. The nonlocal point of contact of the probe with a rough surface in the form of a trapezoid:

1, 4 – planes of the valleys and the peaks; 2 – the theoretical point of contact of the ideal probe and perfectly flat plane; 3 – the nonlocal point of probable contact of the lateral face of the probe with the roughness peak; 5 – the probe in the form of a pyramid; 6 – the normal to the plane of the valleys; 7 – the axis of symmetry of the pyramidal probe

зонда создаёт дополнительные трудности как при решении контактной задачи механики для гладких тел (гладкого зонда и поверхности образца), так и в случае предложенной авторами [6, 7] методики определения нелокального влияния шероховатости. Это объясняется прежде всего тем, что зонд обычно достаточно острый и область его контакта с поверхностью настолько мала, что не существует необходимой статистики его взаимодействия с выступами шероховатости. Более того, теоретически при измерении рельефа поверхности образца отсутствует значимое силовое взаимодействие зонда с выступами шероховатости.

Таким образом, цель настоящей статьи – создание более простой геометрической модели определения нелокального контакта зонда и шероховатой поверхности. Под нелокальностью контакта в данном случае будем подразумевать учёт возможности случайного взаимодействия зонда с выступами шероховатости не только вершиной, но и боковыми поверхностями зонда. Это методическое допущение позволяет проанализировать связь геометрических характеристик зонда и высоты шероховатости с достоверностью измерений рельефа поверхности образца при разных разрешениях АСМ. В качестве условий надёжности измерений примем простое условие достаточной прямолинейности ломаной линии, соединяющей случайные шероховатые выступы, с которыми взаимодействовали вершина и боковые поверхности зонда.

Основные предположения. Среднестатистическое взаимодействие двух шероховатых тел сводится к задаче о взаимодействии гладких тел. Границы гладких тел определены поверхностями математического ожидания с нанесёнными на них шероховатостью. Шероховатость имеет отклонения в направлении внешней нормали к поверхностям математического ожидания этих тел [6, 7]. К сожалению, в рассматриваемом случае такая модель не применима, поскольку (в зависимости от угла 2φ при вершине зонда между его боковыми поверхностями и от углов наклона сторон шероховатых выступов) пирамидальный зонд теоретически может касаться дна впадин (рис. 1–3). Поэтому в данном случае и модель зонда строится от плоскости впадин согласно ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики».

По аналогии с линиями выступов и впадин ([8] и ГОСТ 2789-73) определим плоскости выступов и впадин как плоскости, параллельные средней плоскости неровности поверхности образца (зонда) и проходящие через наибольший выступ и наибольшую впадину соответственно. Отметим, что при указанных построениях нормаль к средней плоскости неровностей поверхности будет являться также нормалью к плоскостям выступов и впадин. Введём в соответствии с ГОСТ 2789-73 следующие обозначения: $R_{z,3}$, $R_{z,0}$ – наибольшие высоты неровностей (т. е. расстояний между плоскостями впадин и выступов) зонда и поверхности образца соответственно. Эти величины определяются

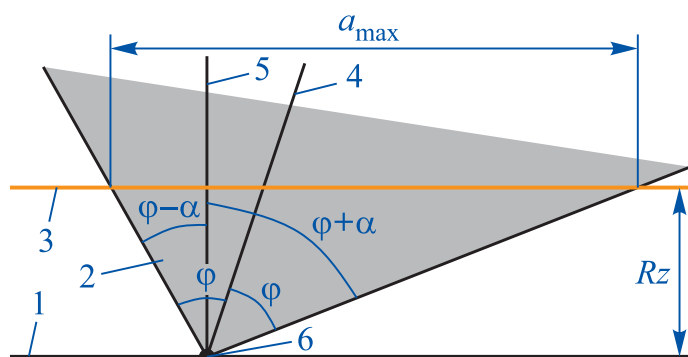


Рис. 3. Определение максимального размера нелокальной точки в виде трапеции для зонда в виде правильной четырёхгранной пирамиды: 1, 3 – плоскости впадин и выступов соответственно; 2 – зонд под углом α (вид сбоку); 4 – ось симметрии плоского сечения зонда; 5 – нормаль к плоскости впадин; 6 – теоретическая точка идеального касания зонда и поверхности образца

Fig. 3. Determination of the maximum size of a nonlocal point in the form of a trapezoid for the probe in the form of a regular tetrahedral pyramid: 1, 3 – planes of the valleys and the peaks; 2 – the probe at an angle α (side view); 4 – the axis of symmetry of the plane section of the probe; 5 – the vertical to the plane of the valleys; 6 – the theoretical point of perfect contact of the probe and the surface of the sample

после построения плоскостей выступов и впадин. Согласно общей практике (см. ГОСТ 2789-73) решения задач с шероховатостью предположим взаимодействие двух тел с определёнными отклонениями формы поверхности как взаимодействие одного тела идеальной формы и другого тела с суммарной неровностью поверхности. Таким образом, в настоящей статье рассмотрим задачу о взаимодействии зонда идеальной формы и образца, поверхность которого имеет эквивалентный шероховатый слой суммарной наибольшей высотой эквивалентного профиля неровностей: $R_z = R_{z,3} + R_{z,0}$ (см. рис. 1, 2).

Геометрическое определение площади вероятностного контакта зонда АСМ и выступов эквивалентной шероховатой поверхности при относительно небольших углах наклона кантилевера ($\alpha < \phi$). Для построения геометрической модели наложим два изображения зонда идеальной формы, касающегося плоскостей впадин и выступов (см. рис. 2). Проекция активной площади зонда, в которой может произойти касание зонда и шероховатого выступа, определяется площадью сечения зонда на уровне плоскости выступов. Эту площадь (в форме трапеции) назовём нелокальной точкой касания зонда эквивалентной шероховатой поверхности. Размеры нелокальной точки связаны с наибольшей высотой эквивалентного профиля R_z , углом ϕ между высотой зонда и его боковой гранью, а также углом α наклона кантилевера при касании поверхности (см. рис. 1, 2). Чем больше угол α , тем больше площадь трапеции (нелокальной точки). В идеале (см. рис. 2) при $\alpha = 0$ для идеального кантилевера нелокальная точка контакта в форме квадрата

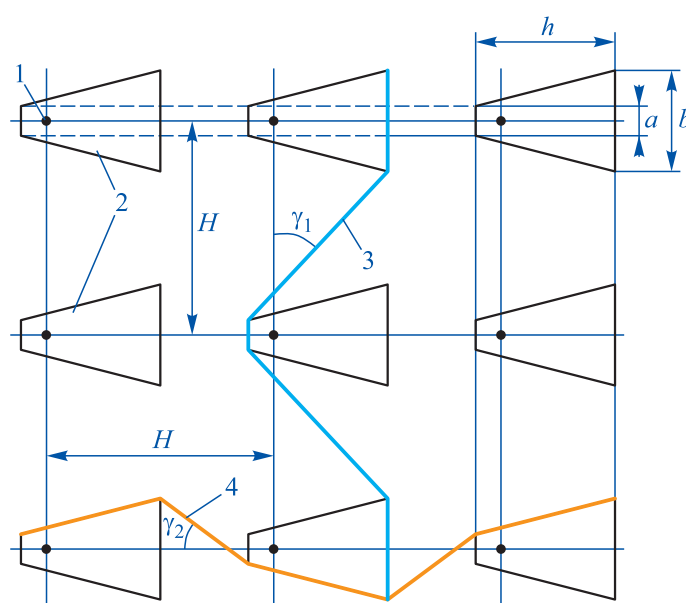


Рис. 4. Система идеальных точек касания (1) зонда на плоскости и система нелокальных областей (2) вероятностного контакта случайной шероховатости и боковой поверхности правильной четырёхгранной пирамиды на наклонном кантилевере; ломаные линии 3, 4 – максимально возможная оценка отклонений координат реального контакта зонда от прямой линии соответственно при поперечном и продольном перемещениях

Fig. 4. The system of ideal points of contact (1) of the probe on the plane and the system of nonlocal regions (2) of the probabilistic contact of random roughness and the lateral surface of the regular tetrahedral pyramid on the inclined cantilever; broken lines is the maximum possible estimation of the deviations of the coordinates of the real contact of the probe from a straight line for a transverse (3) and longitudinal (4) movements

со стороной $a = b = h = 2R_z \tan \phi$ имеет минимальную площадь. Площадь трапеции – произведение длины средней линии $s = (a + b)/2$ и высоты h , эти параметры используем далее для оценки точности измерений рельефа поверхности образца.

При угле α , отличном от нуля, но меньшем угла ϕ , длина средней линии трапеции контакта выражается как

$$s = 2R_z \tan \phi / \cos \alpha. \quad (1)$$

Высота трапеции контакта определяется уравнением (см. рис. 3):

$$h = R_z [\tan(\phi + \alpha) + \tan(\phi - \alpha)]. \quad (2)$$

При увеличении угла α увеличивается и погрешность определения точки касания зондом шероховатой поверхности.

Условие надёжности измерений рельефа поверхности с помощью АСМ при относительно небольших углах наклона кантилевера ($\alpha < \phi$). Пусть H – одинаковый

заданный шаг перемещений зонда по обеим координатам при дискретном измерении высот поверхности образца. Тогда максимальные отклонения координат реального контакта выступов эквивалентной шероховатости и поверхности идеального зонда определяются ломанными линиями 3, 4 на рис. 4. Для признания достоверности измерения рельефа поверхности образца шаг измерений H , углы γ_1, γ_2 (см. рис. 4) с достаточной точностью необходимо признать равными нулю, так как все точки касания зонда шероховатой поверхности должны лежать на одной линии с достаточной точностью. Обычная погрешность технических измерений и вычислений составляет не более 0,5 % измеряемой или вычисляемой величины.

Согласно рис. 4 можно записать

$$\left. \begin{aligned} \cos \gamma_1 &= \frac{H-s}{\sqrt{h^2 + (H-s)^2}} \approx 1 - \frac{h^2}{2(H-s)^2}; \\ \cos \gamma_2 &= \frac{H-h}{\sqrt{s^2 + (H-h)^2}} \approx 1 - \frac{s^2}{2(H-h)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Чтобы выражения (3) с указанной выше погрешностью были близки к единице, выражения $h^2/[2(H-s)^2]$, $s^2/[2(H-h)^2]$ должны быть малыми величинами. Таким образом, условием надёжности измерений геометрии поверхности являются одновременное выполнение простейших неравенств

$$h/(H-s) < 0,1; \quad (4)$$

$$s/(H-h) < 0,1. \quad (5)$$

Подставим выражения (1), (2) в неравенства (4), (5) и получим достаточное условие надёжности измерений (т. е. разрешения длины шага H) с учётом всех геометрических параметров задачи:

$$\begin{aligned} H &> (R_{z,3} + R_{z,0}) \max(A, B); \\ A &= 10 [\operatorname{tg}(\varphi + \alpha) + \operatorname{tg}(\varphi - \alpha)] + 2 \operatorname{tg} \varphi / \cos \alpha; \end{aligned}$$

$$B = [20 \operatorname{tg} \varphi / \cos \alpha + \operatorname{tg}(\varphi + \alpha) + \operatorname{tg}(\varphi - \alpha)].$$

При угле наклона кантилевера $\alpha=0$ и очень остром пирамидальном зонде с углом при вершине $\varphi \leq 10^\circ$ для получения надёжных измерений рельефа поверхности образца (чтобы точки касания зондом поверхности лежали на одной линии) шаг измерений H должен практически в пять раз превышать суммарную высоту R_z . Таким образом, если $H < R_z$, то невозможно признать надёжными данные, полученные с помощью указанного зонда.

Ситуация значительно ухудшается при $\varphi=20^\circ$, $\alpha=15^\circ$. Тогда даже при идеальной форме зонда шаг измерений должен превышать суммарную высоту почти на порядок.

При использовании в качестве зондов стандартных пирамид Виккерса [9], у которых $\varphi=68^\circ$, и при угле наклона $\alpha=30^\circ$ шаг измерений должен превышать суммарную высоту

более чем в 50 раз. В этом случае одновременное исследование нанорельефа и нанотвёрдости поверхности одним зондом с требуемой надёжностью невозможно.

Таким образом, на взгляд авторов настоящей статьи очевидно, что публикации, в которых при измерении морфологии поверхности образцов с помощью АСМ не указаны параметры неровностей поверхности образца и зонда, углы при вершине зонда и наклона кантилевера, а также наилучшее разрешение (наименьший шаг) измерений, нельзя считать достоверными, так как они носят вероятностный характер. Подобные изображения поверхности, полученные методом атомно-силовой микроскопии, представляют лишь качественную картину, на основе которой нет смысла проводить какие-либо вычислительные манипуляции.

Случай $\alpha \geq \varphi$ рассматривать не имеет смысла, поскольку увеличивается нелокальная точка вероятного касания боковой грани кантилевера и для пирамидального индентора переходит в треугольник. Соответственно увеличиваются углы γ_1, γ_2 и необходимое отношение шага измерений H к суммарной высоте R_z неровностей образца и зонда.

Заключение. В рамках созданной упрощённой геометрической модели нелокального контакта зонда и шероховатой поверхности установлена связь между основными геометрическими параметрами шероховатости поверхности, геометрических отклонений зонда, углов наклона кантилевера и наклона боковых граней зонда, а также размерами нелокальной точки вероятного контакта его боковых граней с выступами шероховатости. По итогам выполненных исследований в качестве достаточного условия надёжности измерений рельефа поверхности образца с помощью АСМ предложено очевидное требование малости отношения размеров нелокальной точки к расстоянию между соседними нелокальными точками. Чтобы увеличить надёжность измерений рельефа поверхности, необходимо в несколько раз повысить точность изготовления зондов АСМ, а также использовать зонды с наименьшим возможным углом при вершине. Также необходимо предусмотреть автоматический итерационный поворот предметного стола АСМ на углы в двух вертикальных координатных плоскостях, определённые по результатам нескольких измерений геометрии поверхности, для того чтобы срединная плоскость шероховатой поверхности образца совпала с координатной плоскостью АСМ. При этом конструкцию консоли следует изменить так, чтобы её основание находилось за пределами образца.

Необходимо отметить ещё раз, что не могут считаться достоверными публикации, в которых при измерениях геометрии поверхности с использованием АСМ не указаны статистические параметры шероховатостей образца и зонда, углы при вершине зонда и наклона кантилевера, а также наименьший шаг, на котором проводится исследование геометрии поверхности. Это связано с высокой вероятностью того, что указанные в данных работах результаты не удовлетворяют предложенному достаточному условию достоверности измерений и поэтому не могут использоваться в дальнейших математических вычислениях.

Список литературы

References

1. Haugstad G., *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*, JohnWiley & Sons, Inc., 2012, 520 p.
2. Vesely J., *Nanoscale AFM and TEM Observations of Elementary Dislocation Mechanisms*, Springer International Publishing AG, 2017, 100 p. DOI: 10.1007/978-3-319-48302-3
3. *Springer Handbook of Nanotechnology*, ed. Bhushan B., Springer-Verlag GmbH, 2017, 1704 p.
4. Afferrante L., Bottiglione F., Putignano C., Persson B. N. J., Carbone G., *Tribology Letters*, 2018, vol. 66, no. 75. DOI: 10.1007/s11249-018-1026-x
5. Кравчук А. С., Кравчук А. И., Рымуза З., Валбуса У., Буцо Р. Теоретические основы идентификации фрактальности поверхности твердого тела // Трение и износ. 2011. Т. 32. № 5. С. 445–450.
6. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I., Rymuza Z., *Technische Mechanik*, 2004, band 24, heft 2, pp. 116–124.
7. Кравчук А. С. Нелокальный контакт шероховатых тел по эллиптической области // Известия РАН. Механика твёрдого тела. 2005. № 3. С. 42–52.
8. Демкин Н. Б. Теория контакта реальных поверхностей и трибология // Трение и износ. 1995. Т. 16. № 6. С. 1003–1025.
9. Кузнецова Т. А. Применение атомно-силовой микроскопии в методах индентирования // Материалы VII Международного семинара «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», Минск, Беларусь, 1–3 ноября 2006. Минск: ИТМО НАНБ, 2006. С. 246–251.

1. Haugstad G., *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*, JohnWiley & Sons, Inc., 2012, 520 p.
2. Vesely J., *Nanoscale AFM and TEM Observations of Elementary Dislocation Mechanisms*, Springer International Publishing AG, 2017, 100 p. DOI: 10.1007/978-3-319-48302-3
3. *Springer Handbook of Nanotechnology*, ed. Bhushan B., Springer-Verlag GmbH, 2017, 1704 p.
4. Afferrante L., Bottiglione F., Putignano C., Persson B. N. J., Carbone G., *Tribology Letters*, 2018, vol. 66, no. 75. DOI: 10.1007/s11249-018-1026-x
5. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I., Rymuza Z., Valbusa U., Buzio R., *Friction and Wear*, 2011, vol. 32, no. 6, pp. 445–450.
6. Kravchuk A. S., Kravchuk A. I., Rymuza Z., *Technische Mechanik*, 2004, band 24, heft 2, pp. 116–124.
7. Kravchuk A. S., *Mechanics of Solids*, 2005, no. 3, pp. 42–52.
8. Demkin N. B., *Friction and Wear*, 1995, vol. 16, no. 6, pp. 1003–1025.
9. Kuznecova T. A., *Proceedings of the VII International seminar “Methodological aspects of scanning probe microscopy”*, Minsk, Belarus, November 1–3, 2006, Minsk, ITMO NASB Publ., 2006. pp. 246–251.

Дата поступления: 15.11.2020.

Дата принятия: 04.12.2020.

Sufficient condition for reliability measurement of sample geometry by atomic force microscopy

Alexander S. Kravchuk¹, Anzhelika I. Kravchuk²

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: ask_belarus@inbox.ru

²Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: anzhelika.kravchuk@gmail.com

A sufficient condition for determining the reliability of geometry measurements using atomic force microscopy for relatively small cantilever tilt angles is proposed. A relationship between the basic geometric parameters of surface roughness, geometric deviations of the probe, the angles of the cantilever and the inclination of the side faces of the probe, as well as the dimensions of the nonlocal point of the probable contact of its side faces with protrusions of roughness has been established. As a sufficient condition for the reliability of geometry measurements using atomic force microscopy, an obvious requirement is accepted. It determines the smallness of the ratio of the sizes of a nonlocal point to the distance between neighboring nonlocal points. Publications in which the measurement of surface nano-geometry of the samples does not indicate the roughness of the sample surface and the probe, the angles at the tip of the probe and the tilt of the cantilever, as well as the best resolution (smallest step) at which the study is carried out, cannot be accepted as reliable, because the results obtained in them are probabilistic in nature. The surface images obtained using atomic force microscopy without proper justification for the resolution (value of the measurement step) represent only a qualitative picture, on the basis of which it makes no sense to carry out any computational manipulations. In order to increase the reliability of measurements of surface geometry using atomic force microscopy, it is necessary to radically increase the accuracy of the manufacture of probes, as well as use probes with the smallest possible angle at the apex. In addition, it is necessary to make changes in the design of the atomic force microscopy. In particular, the automatic rotation of the microscope stage should be designed. It should provide closeness the probe axis direction to the normal to the average plane of the sample. This “integral” angle of rotation of the microscope stage is easily iteratively determined at the stage of preliminary investigation of the geometry of the surface of the sample. In this case, it will be necessary to geometrically increase the length of the cantilever so that the base extends beyond the limits of the sample.

Key words: atomic force microscope, atomic force microscopy, cantilever, probe, tetrahedral pyramid, reliability criterion for measuring surface geometry.

Совершенствование методов и средств Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли

С. Л. Пасынок, И. В. Безменов, И. Ю. Игнатенко, Е. Н. Цыба, В. Е. Жаров

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: pasynok@vniiftri.ru, bezmenov@vniiftri.ru, igig@vniiftri.ru, tsyba@vniiftri.ru, zharov@sai.msu.ru

Описаны результаты работ 2015–2020 гг. по совершенствованию методов и средств Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли. Модернизация осуществлялась как в части аппаратного обеспечения, так и программного обеспечения. В настоящее время в результате проведённых работ в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли имеется программный коррелятор, обновлены средства вычислительной техники, создан Центр обработки и анализа данных Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли. В настоящее время Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений обладает спутниковым лазерным дальномером нового поколения, созданным Научно-производственной корпорацией «Системы прецизионного приборостроения». Разработан новый программный комплекс обработки лазерных измерений, создано программное обеспечение для обработки лунных лазерных дальномерных измерений. Разработан программный комплекс определения и метрологического обеспечения орбит космических аппаратов российской и американской глобальных навигационных спутниковых систем. Модернизировано программное обеспечение для обработки измерений на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами и программное обеспечение для совместной обработки данных. Развитие средств определения и прогнозирования параметров вращения Земли во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений шло в русле современных международных тенденций, что позволило обеспечить проведение работ, направленных на определение и прогнозирование параметров вращения Земли, на высоком международном уровне.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, служба определения параметров вращения Земли, радиоинтерферометры со сверхдлинными базами, глобальные навигационные спутниковые системы, спутниковая и лунная лазерная дальнометрия, комбинирование.

Введение. На Главный метрологический центр Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) возложено научное, методическое и оперативное обеспечение работы ГСВЧ по воспроизведению национальной шкалы времени и эталонных частот, по определению параметров вращения Земли (ПВЗ), а также по обеспечению потребности государства в эталонных сигналах времени и частоты, в информации о ПВЗ и точном значении московского времени и календарной дате.

ПВЗ характеризуют взаимное расположение земной системы координат (ЗСК) и небесной системы координат (НСК) друг относительно друга. Поскольку уравнения движения тел в околоземном пространстве наиболее простой вид имеют в НСК, а измерительные приборы и станции слежения расположены на поверхности Земли, то необходимо знать ответ на вопрос: как поверхность Земли в каждый момент времени

ориентирована относительно НСК. Если объекты движутся по поверхности Земли или под водой в автономном режиме (без связи с внешними источниками информации), то для описания их движения также важны ПВЗ.

Особые требования к точности, оперативности и надёжности данных о ПВЗ предъявляются со стороны фундаментальной науки и современных средств оборонной техники и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Поскольку из-за вращения Земли в ЗСК действуют силы инерции, то знание ПВЗ также необходимо для новой бурно развивающейся отрасли – инерциальной навигации.

В связи с непрерывно растущими требованиями к точности и оперативности информации о ПВЗ средства определения и прогнозирования ПВЗ ГМЦ ГСВЧ постоянно совершенствуются. В настоящей статье подведены итоги работ в этом направлении, проведённых в 2015–2020 гг. в ГМЦ ГСВЧ.

Модернизация измерительных средств. Модернизация измерительных средств в этот период была связана с созданием в Научно-производственной корпорации «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП», Institute for precision instrument engineering) систем лазерной дальнометрии нового поколения. В рамках этих работ во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») и его Восточно-Сибирском филиале были установлены лазерные системы нового поколения, способные обеспечить миллиметровую точность измерений наклонной дальности [1]. Новые станции соответствуют стандарту SLR2000, принятому Международной службой вращения Земли и опорных систем (МСВЗ) для лазерных систем нового поколения [2]. Новая система не только не уступает зарубежным аналогам, но и по ряду показателей превосходит их. В частности, помимо задач определения ПВЗ, она обеспечивает возможности проводить лазерную передачу времени и измерения расхождения бортовых шкал времени [1].

Создание средств корреляционной обработки. Совместными усилиями Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) и ВНИИФТРИ создан программный коррелятор ГМЦ ГСВЧ [3]. Он позволяет производить первичную (корреляционную) обработку измерений на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ) нового поколения на основе малых (диаметром около 13 м) быстороворотных антенн (полный оборот за полминуты). Коррелятор ГМЦ ГСВЧ использует графические процессоры для обработки потока данных измерений, поступающих со средней скоростью 32 Гбит/с, и способен обрабатывать данные с четырёх станций, приходящие на коррелятор со средней скоростью по 8 Гбит/с [4]. Программное обеспечение корреляционной обработки программного коррелятора ГМЦ ГСВЧ прошло метрологическую аттестацию.

Модернизация средств определения орбит и поправок часов космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS. В настоящее время в ГМЦ ГСВЧ создан программный комплекс для определения эфемеридно-временной информации (ЭВИ) – орбит и поправок часов – космических аппаратов ГПСС Российской Федерации (ГЛОНАСС) и Соединённых штатов Америки (GPS) в трёх режимах: а) апостериорном [5], б) срочном [6] и в) оперативном [7].

Апостериорная информация формируется (с задержкой примерно 2 недели) по результатам совместной обработки данных по орбитам и поправкам часов, полученных в отечественных и зарубежных центрах обработки и анализа данных (ЦОАД). Обработка выполняется по специальному алгоритму, состоящему из нескольких шагов. На первом шаге определяются параметры трансформаций Гельмерта, целью которых является приведение эфемерид космических аппаратов ГНСС, полученных различными ЦОАД, к единой орбитальной системе. На втором шаге на основе статистического подхода определяются весовые коэффициенты ЦОАД и каждого космического аппарата. На третьем, заключительном, шаге определяются средневзвешенные значения

эфемерид спутников [5]. Аналогичной процедуре подвергаются поправки часов каждой из спутниковых группировок космических аппаратов при приведении шкал времени различных ЦОАД к единой системной шкале, определяемой по данным навигационных сообщений, предварительно очищенных от выбросов по алгоритму [8]. В процессе обработки для каждого из ЦОАД выявляются так называемые плохие спутники, данные по которым исключаются из процесса формирования итоговых значений. В результате с периодичностью 1 раз в сутки создаётся файл в формате SP3 (Standard Product 3), содержащий данные по орбитам и поправкам часов космических аппаратов GPS и ГЛОНАСС. Именно эти значения используются в качестве опорных при оценке точности срочных и оперативных данных по орбитам и поправкам часов ГЛОНАСС, полученных в ГМЦ ГСВЧ, а также в других ЦОАД.

В срочном (задержка примерно 1 сутки) и оперативном (реальное время) режимах ЭВИ рассчитывается непосредственно из обработки ГНСС измерений от приблизительно 500 станций, входящих в глобальную сеть Международной ГНСС службы (IGS).

При получении ЭВИ в срочном режиме исходными данными для расчётов являются данные измерений в формате суточных RINEX-d/g/n-файлов (RINEX – Receiver Independent Exchange Format – формат обмена данными ГНСС-измерений, не зависящий от приёмного устройства). Итоговая информация выдаётся в виде SP3-файла с периодичностью 1 раз в сутки.

В оперативном режиме информация по орбитам и поправкам часов формируется в результате обработки часовых RINEX-d/g/n-файлов и выдаётся с периодичностью 6 ч (4 раза/сут), соответствующий SP3-файл содержит ЭВИ за двухсуточный интервал [7].

Разработанный в ГМЦ ГСВЧ программный комплекс позволяет полностью автоматизировать процессы сбора данных измерений, расчёта ЭВИ космических аппаратов и выдачи результирующих SP3-файлов и других файлов отчётов. При разработке комплекса были использованы программные модули пакета прикладных программ BERNESE GNSS Software 5.2, разработанного в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария) [9], а также программная оболочка этого пакета, предоставляющая средства для распараллеливания вычислений.

Для оценки точности орбит и поправок часов GPS, а также орбит ГЛОНАСС использовались апостериорные данные IGS.

Тестовые вычисления, проведённые за различные периоды, показали, что среднеквадратическая погрешность (СКП), полученных в ГМЦ ГСВЧ оперативных орбит составляет порядка 1,7 и 4,5 см для GPS и ГЛОНАСС соответственно, а СКП поправок часов не превосходит 1 нс для каждой из группировок.

Работы по совершенствованию программного обеспечения ГМЦ ГСВЧ продолжаются в направлениях совместной обработки измерений по сигналам всех доступных космических аппаратов ГНСС (согласно рекомендациям IGS о развитии

средств обработки и анализа данных ГНСС), а также организации ежесуточной службы определения ЭВИ ГНСС в ГМЦ ГСВЧ.

Модернизация средств определения ПВЗ по отдельным видам измерений. С 15 мая 2015 г. определение ПВЗ по данным измерений спутниковых лазерных дальномеров (СЛД) ведутся с помощью разработанного в ГМЦ ГСВЧ [10] аппаратно-программного комплекса. Эти данные участвуют в совместной обработке всех данных о ПВЗ и вносят вклад в формируемые выходные данные ПВЗ ГСВЧ. Ежедневно в ЦОАД ГМЦ ГСВЧ поступает измерительная информация со всех активных измерительных пунктов сети Международной службы лазерной локации спутников и Луны (ILRS) и в том числе с СЛД «Сажень-ТМ-БИС», расположенных во ВНИИФТРИ. Эти дальномеры были изготовлены АО «НПК «СПП» и установлены во ВНИИФТРИ и его Восточно-сибирском филиале в рамках совместных работ АО «НПК «СПП» и ВНИИФТРИ. Именно на них сейчас проводятся регулярные лазерные измерения дальностей до космических аппаратов «Лагос-1» и «Лагос-2» для определения ПВЗ. Программа в автоматическом режиме (без участия оператора) анализирует полученные данные и выполняет в оперативном режиме расчёт ПВЗ. С 2017 г. программа также ежедневно выдаёт результаты обработки измерений в формате Solution, software, technique INdependent EXchange Format (SINEX), которые затем используются при совместной обработке (комбинировании) результатов частичной обработки измерений различных видов (РСДБ, ГНСС и СЛД) на уровне нормальных уравнений (сейчас в режиме исследований).

В 2017 г. для обработки суточных сессий РСДБ-измерений сети Международной РСДБ-службы (IVS) введён отечественный программный пакет «Ариадна», разработанный в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (ГАИШ МГУ) [11]. Он был модернизирован в ГМЦ ГСВЧ для ведения оперативной службы [12]. Программа также формировала SINEX-файлы, но только по суточным сессиям РСДБ-измерений. Следующая модернизация состоялась в 2018 – начале 2019 гг. и была связана с тем, что для запуска обработки по SINEX-файлам было необходимо обеспечить формирование SINEX-файлов не только по суточным, но и по часовым РСДБ-сессиям, и тем, что необходимо было обеспечить возможность чтения файлов РСДБ-измерений в новом формате – vgosDB [13]. Это было очень своевременно, поскольку с лета 2019 г. IVS больше не публикует файлы измерений в старых форматах. По причине перехода на новый формат пришлось также полностью переделать управляющую программу [14], разработанную ранее.

В связи с началом поступления в ГМЦ ГСВЧ данных первичной (корреляционной) обработки результатов РСДБ-измерений с малых (диаметром 13 м) быстроповоротных (полный оборот за полминуты) РСДБ-антенн нового поколения, созданных в ИПА РАН [15], необходимо было наладить их вторичную обработку в ГМЦ ГСВЧ в ежесуточном режиме данных. Для этого была разработана управляющая программа,

которая получает измерения с сервера ИПА РАН, необходимые для обработки данные, запускает вычисляющую программу на выполнение, анализирует и выдает выходные данные. В качестве вычисляющей программы используется программный пакет OCCAM [16]. В результате определений в 2018 г. получена погрешность менее 20 мкс для окончательных данных и с конца февраля 2019 г. эти данные используются в сводной обработке при формировании официальных данных о всемирном времени.

Для определения ПВЗ из ГНСС измерений в ГМЦ ГСВЧ используется программа [17]. За прошедший период она была модернизирована в части обеспечения формирования SINEX-файлов и изменения состава измерительной сети.

Новые направления развития средств обработки и анализа данных в ГМЦ ГСВЧ. В настоящее время в рамках совместных работ АО «НПК «СПП» и ВНИИФТРИ создается уникальный для России инструмент – лунный лазерный дальномер (ЛЛД) [18]. Сейчас только три обсерватории в мире могут проводить такие измерения и все они находятся за рубежом. Одним из применений такого инструмента является определение всемирного времени по результатам лазерной локации Луны. Для обработки лунных лазерных дальномерных измерений в ГМЦ ГСВЧ был разработан программный комплекс [19] на языке программирования MATLAB. Пока обработка лазерных лунных измерений проводится в режиме исследований по данным ILRS, но как только появятся отечественные данные измерений, они сразу же будут включены в обработку.

Другим новым направлением работ в ГМЦ ГСВЧ является обработка данных измерений спутниковой альтиметрии. В ГМЦ ГСВЧ было разработано программное обеспечение [14] для определения уклонов отвесных линий (УОЛ) по данным спутниковой альтиметрии и проводится вычисление орбит низкоорбитальных спутников по данным ГНСС и СЛД. Ранее определение орбит проводилось с помощью [9], однако сейчас для вычислений используется программа собственной разработки (язык программирования – Python).

Модернизация средств совместной обработки. Высшим звеном обеспечения единства измерений в области определения ПВЗ является формирование опорных значений ПВЗ на основе совместной обработки (комбинирования) всей совокупности данных измерений и/или данных их предварительной обработки, полученных с помощью различных астрометрических и геодезических видов измерений (РСДБ, ГНСС и СЛД).

Также для определения ПВЗ используют измерения с помощью глобальной доплеровской спутниковой системы определения орбит спутников (DORIS) и ЛЛД.

Совокупность определённых таким образом ПВЗ, выполненная уполномоченной (постановлением, стандартом и т.д.) на эту деятельность организацией, образует принятую опорную шкалу направлений в пространстве. Согласно Международному словарю основных и общих терминов в метрологии (International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)), принятая

опорная шкала (англ. conventional reference scale) – шкала значений величины, установленная официальным соглашением. Поэтому такая шкала является принятой опорной шкалой ПВЗ, уровень которой определяется уровнем соглашения.

В России согласно Постановлению Правительства РФ № 225 «Об утверждении Положения о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли» принятой опорной шкалой ПВЗ является шкала, формируемая в ГМЦ ГСВЧ на основе совместной обработки (комбинирования) измерений различных видов (РСДБ, ГНСС, СЛД). В международном масштабе эту проблему решает МСВЗ.

За прошедший период имеющиеся средства совместной обработки ГМЦ ГСВЧ модернизированы, а также созданы новые.

Основным методом сводной обработки (комбинирования) в оперативном режиме в настоящее время остается метод комбинирования на уровне временных рядов [17], как и в МСВЗ [20]. Данный метод модернизирован в части совершенствования алгоритма формирования систематически несмещённой части ПВЗ и включения в обработку данных первичной (корреляционной) обработки результатов измерений с РСДБ-антенн нового поколения, присылаемых из ИПА РАН. В результате повышения точности исходных данных для комбинирования (в том числе, привлечения результатов корреляционной обработки результатов измерений с РСДБ-антенн нового поколения, присылаемых из ИПА РАН) и модернизации средств совместной обработки (комбинирования) ГМЦ ГСВЧ точность комбинированных значений ПВЗ, формируемых в ГМЦ ГСВЧ в 2019 г., увеличена в 1,5–2 раза [21].

Современной тенденцией в области комбинирования является переход на совместную обработку на уровне нормальных уравнений, сохранённых в виде SINEX-файлов. В настоящее время этот алгоритм используется IERS только для формирования апостериорных значений ПВЗ. В ГМЦ ГСВЧ ежедневно обрабатываются SINEX-файлы для совместного определения координат пунктов и ПВЗ в режиме исследований [21].

Заключение. Кроме описанных результатов работ, проводимых в части совершенствования средств ГМЦ ГСВЧ, велось непрерывное ежесуточное определение ПВЗ ГСВЧ [23] в части справочных данных о ПВЗ. Сформированные на основе этих данных информация о ПВЗ и официальные бюллетени ГСВЧ доводились до потребителей с помощью установленных каналов связи: почта, электронная почта, web-сайт, ftp-сервер, факс, телефон и др.

В целом средства определения и прогнозирования ПВЗ ВНИИФТРИ развиваются в русле международных тенденций [22], что позволило обеспечить проведение работ, направленных на определение и прогнозирование ПВЗ на высоком международном уровне. Среднеквадратические отклонения ПВЗ ГСВЧ от данных МСВЗ по всей совокупности данных составили во второй половине 2019 г. 0,00007" по каждой из координат земного полюса и 17 мкс по Всемирному времени

в апостериорном режиме. Так как данные МСВЗ вычисляются по гораздо более представительной совокупности данных измерений, то эту оценку можно рассматривать как косвенную оценку точности данных о ПВЗ ГСВЧ.

Для обеспечения главной задачи – удовлетворения постоянно растущих требований науки, народного хозяйства и обороноспособности страны к точности, оперативности и надёжности обеспечения данными о ПВЗ необходимо непрерывное совершенствование средств определения и прогнозирования ПВЗ. Ближайшие работы будут направлены на повышение достигнутых точности и оперативности определений ПВЗ, а также на повышение точности прогнозирования ПВЗ.

Список литературы

1. Барышников М. В., Блинов И. Ю., Бондарев Н. Н., Борисов Б. А., Донченко С. И., Колычев А. М., Некрасов Ю. В., Мартынов С. В., Садовников М. А., Шаргородский В. Д. Результаты испытаний российской лазерной станции нового поколения «Точка» // Тезисы Восьмой всероссийской конференции «Фундаментальное прикладное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019). СПб: ИПА РАН, 2019. С. 18.
2. Degnan J., McGarry J., Zagwodzki T., Titterton P., Sweeney H., Donovan H., Perry M., Conklin B., Decker W., Cheek J., Mallama A., Dunn P., Ricklefs R. (1996) SLR2000: *An Inexpensive, Fully Automated, Eyesafe Satellite Laser Ranging System, Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, Shanghai – China. pp. 367–377.
3. Донченко С., Щипунов А., Денисенко О., Блинов И., Федотов В., Сильвестров И. Развитие средств метрологического и фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС во ФГУП «ВНИИФТРИ» // Авиапанорама. 2018. № 1(127). С. 32–37.
4. Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Кен В. О., Курдубова Я. Л., Мишин В. Ю., Мишина Н. А., Шантырь В. А. Программный коррелятор для обработки наблюдений РСДБ-сети малых антенн. Результаты первых испытаний // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 36. С. 83–89.
5. Безменов И. В., Пасынок С. Л. Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. 2015. № 2. С. 143–158.
6. Безменов И. В., Пасынок С. Л. Определение эфемеридно-временной информации космических аппаратов ГНСС в срочном режиме по данным измерений // Альманах современной метрологии. 2017. № 11. С. 104–120.
7. Безменов И. В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 11–17. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-1-11-17
8. Безменов И. В., Наумов А. В., Пасынок С. Л. Эффективный алгоритм устранения выбросов из данных измерений глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 26–30. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-9-26-30

9. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (Eds); 2015: *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297

10. Цыба Е. Н. Вычисление параметров вращения Земли по результатам спутниковой лазерной дальнометрии международной сети ILRS // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 38. С. 66–70.

11. Жаров В. Е. Основы радиоастрометрии. М: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. С. 208–224.

12. Жаров В. Е., Пасынок С. Л., Синёв А. Н. Определение параметров вращения Земли из РСДБ наблюдений с помощью программного комплекса «Ариадна» // Тезисы докладов седьмой Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017). СПб.: ИПА РАН, 2017. С. 123–124.

13. Gipson J., *IVS Working Group 4 on VLBI Data Structures, The 5th IVS General Meeting Proceedings*, 2008, pp. 143–152.

14. Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Цыба Е. Н., Жаров В. Е. Определение ПВЗ и совершенствование аппаратно-программных средств в ГМЦ ГСВЧ // Труды ИПА РАН. 2019. Вып. 49. С. 60–68.

15. Ипатов А. В., Иванов Д. В. Сеть радиотелескопов РТ-13 комплекса «Квазар-КВО»: первые результаты // Тезисы Восьмой всероссийской конференции «Фундаментальное прикладное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019). СПб.: ИПА РАН, 2019. С. 15.

16. Titov O., Tesmer V., Böhm J. (2001), *OCCAM Version 5.0 Software, User Guide, AUSLIG Technical Report 7*, Australian Surveying and Land Information Group (AUSLIG), Canberra.

17. Кауфман М. Б. Точные измерения для высоких технологий: монография / Под ред. П. А. Красовского. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2008. С. 80–118.

18. Васильев В. П., Шаргородский В. Д., Современное состояние высокоточной спутниковой лазерной дальнометрии в России // Фотоника. 2017. № 6. С. 74–85. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.74.85

19. Tcyba E., Volkova O., Determination of Earth Orientation Parameters by SLR in MMC SSTF FSUE VNIIFTRI, *Astrometry, Earth Rotation and Reference systems in the Gaia era, Proceedings of the Journees 2019*, available at: <https://syte.obspm.fr/astro/journees2019/FILES/Tcyba.pdf> (accessed: 09.04.2020).

20. *IERS Annual Report 2016*, Edited by Wolfgang R. Dick and Daniela Thaller, International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2016, 195 p.

21. Пасынок С. Л. Повышение точности определения параметров вращения Земли методом комбинирования результатов измерений различных видов в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли // Измерительная техника. 2020. № 1. С. 39–44. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-1-39-44

22. GGOS Requirements for Core Sites, Global Geodetic Observing System (GGOS), (Revision 2) Draft 3.4, 2015,

available at: https://cddis.nasa.gov/docs/2015/SiteRecDoc_Rev2_D3.4.pdf (accessed: 16.08.2019).

23. Блинов И. Ю., Пасынок С. Л., Безменов И. В., Игнатенко И. Ю., Цыба Е. Н., Вострухов Н. А., Редькина Н. П., Синёв А. Н., Сысак Е. В., Чинилина М. А., Шлегель В. Р., Жестков А. Г. Деятельность ГМЦ ГСВЧ по определению параметров вращения Земли в 2017 году // Альманах современной метрологии. 2018. № 13. С. 9–61.

References

1. Barishnikov M. V., Blinov I. Yu., Bondarev N. N., Borisov B. A., Donchenko S. I., Kolichev A. M., Nekrasov Yu. V., Martinov S. V., Sadovnikov M. A., Shargorodsky V. D., *Abstracts of 8th All-Russian conference "Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye i navigatsionnoye obespecheniye" (KVNO-2019)*, St. Petersburg, 15–19 April, 2019, IAA RAS, 2019, p. 18 (in Russian).

2. Degnan J., McGarry J., Zagwodzki T., Titterton P., Sweeney H., Donovan H., Perry M., Conklin B., Decker W., Cheek J., Mallama A., Dunn P., Ricklefs R. (1996) *SLR2000: An Inexpensive, Fully Automated, Eyesafe Satellite Laser Ranging System, Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation*, Shanghai – China. pp. 367–377.

3. Donchenko S., Shhipunov A., Denisenko O., Blinov I., Fedotov V., Silvestrov I., *Aviaponarama*, 2018, no. 1(127), pp. 32–37 (in Russian).

4. Surkis I. F., Zimovsky V. F., Ken V. O., Kurdubova Ya. L., Mishin V. Yu., Mishina N. A., Shantir V. A., *Proceedings of the IAA RAS*, 2016, Issue 36. pp. 83–89 (in Russian).

5. Bezmenov I. V., Pasynok S. L., *Al'manac of Modern Metrology*, 2015, no. 2, pp. 143–158 (in Russian).

6. Bezmenov I. V., Pasynok S. L., *Al'manac of Modern Metrology*, 2017, no. 11, pp. 104–120 (in Russian).

7. Bezmenov I. V., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2020, no. 1, pp. 11–17 (in Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-1-11-17

8. Bezmenov I. V., Naumov A. V., and Pasynok S. L., *Measurements Techniques*, 2018, vol. 61, no. 9, pp. 878–884. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1518-y>

9. Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P. (Eds); 2015: *Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297

10. Tcyba E. N., *Proceedings of the IAA RAS*, 2016, Issue 38, pp. 66–70 (in Russian).

11. Zharov V. E., *Osnovy radioastrometrii*, Moscow, Fizicheskii fakul'tet MGU im. M. V. Lomonosova Publ., 2011, pp. 208–224 (in Russian).

12. Zharov V. E., Pasynok S. L., Synev A. N., *Abstracts of 7th All-Russian conference "Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye i navigatsionnoye obespecheniye" (KVNO-2017)*, St. Petersburg, 17–21 April, IAA RAS, 2017, pp. 123–124 (in Russian).

13. Gipson J., *IVS Working Group 4 on VLBI Data Structures, The 5th IVS General Meeting Proceedings*, 2008, pp. 143–152.

14. Pasynok S. L., Bezmenov I. V., Ignatenko I. Yu., Tsyba E. N., Zharov V. E., *Proceedings of the IAA RAS*, 2019, Issue 49, pp. 60–68 (in Russian).
15. Ipatov A. V., Ivanov D. V., *Abstracts of 8th All-Russian conference "Fundamental'noye i prikladnoye koordinatno-vremennoye i navigatsionnoye obespecheniye" (KVNO-2019)*, St. Petersburg, 15–19 April, 2019, IAA RAS, 2019. p. 15 (in Russian).
16. Titov O., Tesmer V., Böhm J. (2001), *OCCAM Version 5.0 Software, User Guide, AUSLIG Technical Report 7*, Australian Surveying and Land Information Group (AUSLIG), Canberra.
17. Kaufman M. B., *Tochnyye izmereniya dlya vysokikh tekhnologii: monografiya*, Mendeleevo, VNIIFTRI, 2008, pp. 80–118 (in Russian).
18. Vasilyev V. P., Shargorodsky V. D., *Photonics*, 2017, no. 6, pp. 74–85. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.74.85.
19. Tsyba E., Volkova O., Determination of Earth Orientation Parameters by SLR in MMC SSTF FSUE VNIIFTRI, *Astrometry, Earth Rotation and Reference systems in the Gaia era, Proceedings of the Journées 2019*, available at: <https://synte.obspm.fr/astro/journées2019/FILES/Tsyba.pdf> (accessed: 09.04.2020).
20. *IERS Annual Report 2016*, Edited by Wolfgang R. Dick and Daniela Thaller, International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau, Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2016, 195 p.
21. Pasynok S. L., *Izmeritel'naya Tekhnika*, 2020, no. 1, pp. 39–44 (in Russian). DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-1-39-44
22. GGOS Requirements for Core Sites, Global Geodetic Observing System (GGOS), (Revision 2) Draft 3.4, 2015, available at: https://cddis.nasa.gov/docs/2015/SiteRecDoc_Rev2_D3.4.pdf (accessed: 16.08.2019).
23. Blinov I. Yu., Pasynok S. L., Bezmenov I. V., Ignatenko I. Yu., Tsyba E. N., Vostruhov N. A., Redkina N. P., Synev A. N., Sysak E. V., Chinilina M. A., Shlegel V. R., Zestkov A. G., *Al'manac of Modern Metrology*, 2018, no. 13, pp. 9–61 (in Russian).

Дата поступления: 22.11.2020.

Дата принятия: 25.12.2020.

Improving methods and facilities of Earth's orientation parameters evaluation in Main metrological center of State service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation

Sergey L. Pasynok, Igor V. Bezmenov, Igor Yu. Ignatenko, Efim N. Tsyba, Vladimir E. Zharov

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (FSUE "VNIIFTRI"), Mendeleevo, Moscow Region, Russian Federation, e-mail: pasynok@vniiftri.ru, bezmenov@vniiftri.ru, igig@vniiftri.ru, tsyba@vniiftri.ru, zharov@sai.msu.ru

The results of improvement of methods and facilities of Earth's orientation parameters in Main metrological center of State service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation in the last five years are considered. The hardware and software are modernized. As result Main metrological center of State service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation has program correlator now, the calculation thechnic was improved, Analysis Center of Main metrological center of State service for time, frequency and Earth's orientation parameters evaluation was created. The Russian metrological institute of technical physics and radio engineering has satellite laser ranging station of new generation now. This station was created by Institute for precision instrument engineering. The new software for satellite laser ranging processing and lunar laser ranging processing was created. The new software of the global navigation satellite systems processing was developed. The software for very long base interferometry data processing and software for combination were modernized. Development of evaluation and predictioning facilities of Earth's orientation parameters Russian metrological institute of technical physics and radio engineering was provided according to modern international direction. This allowed to provide work of evaluation and predictioning of Earth's orientation parameters at the high international level.

Key words: Earth's orientation parameters, Earth's orientation parameters service, very long base interferometers, global navigation satellite systems, satellite and Lunar ranging, combination.

Предварительная калибровка фазового интерполятора прецизионного измерителя временных интервалов

Д. Г. Калинов¹, В. И. Римлянд²

¹Дальневосточный филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений, Хабаровск, Российская Федерация, e-mail: kalinov.d@dfvniiftri.ru

²Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация, e-mail: riml@pnu.edu.ru

Рассмотрены проблемы прецизионных измерений интервалов времени, результаты которых необходимы, например, для оценки метрологических характеристик структурных комплексов космических навигационных систем. Спроектирован прецизионный измеритель временных интервалов. Установлена зависимость между показаниями измерителя и размером измеряемой величины. Разработана и опробована методика предварительной калибровки фазового интерполятора с неравномерным шагом квантования из состава прецизионного измерителя временных интервалов. В процессе создания методики выбрано оптимальное значение опорной частоты и рассчитан оптимальный размер измерительной матрицы, состоящей из последовательно соединённых логических вентилей. Определена степень влияния температуры кристалла (интегральной микросхемы) FPGA на работу фазового интерполятора. Выработаны требования к испытательным сигналам и оценена возможность применения эталонных сигналов вторичных эталонов времени и частоты (например, Государственного вторичного эталона единиц времени и частоты ВЭТ 1-7) в процессе предварительной калибровки фазового интерполятора. Разработано специальное программное обеспечение для определения границ субквантов фазового интерполятора с разрешением единицы пикосекунд, рассчитаны функции плотности вероятности переходного процесса от одного субкванта к последующему. Приведены требования к спектральному составу частоты опорного сигнала и определена частотная отстройка испытательного сигнала относительно опорного. Верификация разработанной методики предварительной калибровки временного положения фазовых переходов интерполятора осуществлена путём повторных калибровок и сопоставления полученных результатов.

Ключевые слова: калибровка, интервал времени, фазовый переход, линия задержек, аппаратно-программный комплекс.

Введение. Прецизионное определение временных интервалов широко используется при решении различных научно-технических и прикладных задач в радиолокации [1], оптической связи, медицине для получения послойного изображения [2], а также при высокоточных измерениях различных физических величин.

Прецизионное измерение интервалов времени является одним из ключевых методов оценки метрологических характеристик структурных комплексов космических навигационных систем, таких как ГЛОНАСС, GPS и других [3]. Работоспособность и точность позиционирования навигационных систем базируется на время-частотных измерениях наземной инфраструктуры разнесённых в пространстве эталонных комплексов времени и частоты, которые состоят из ансамблей (3–15 шт.) стандартов частоты и времени. Рабочие шкалы эталонных комплексов, формируются на основе результатов высокоточных временных измерений [4]. Перспективное развитие навигационных систем выдвигает более высокие требования к аппаратным средствам прецизионного измерения бортовых шкал времени космических аппаратов и наземных эталонных комплексов. Одним из

основных средств измерений как наземных, так и бортовых комплексов является измеритель временных интервалов.

В общем случае результат измерения временных интервалов определяется как сумма целых периодов опорного генератора в течение измеряемого временного интервала и долей периодов, которые формируются в начале и конце измеряемого интервала. Прямой подсчёт периодов опорной частоты в измеряемом интервале позволяет измерять временной интервал с погрешностью $\pm 0,5$ периода опорной частоты. Точные измерения долей периода основаны на разбиении периода опорной частоты на необходимое количество равных частей (субкванты времени). В зависимости от выбранного метода измерения число субквантов на один период может достигать нескольких тысяч. Очевидно, что максимальная точность при оценке доли периода определяется не только количеством субквантов, но точностью и стабильностью временных границ субквантов.

Цель настоящей статьи – создание аппаратно-программного комплекса первичной калибровки фазового интерполятора с неравномерным шагом. Главной функцией фазового интерполятора является прецизионное определение

временных границ субквантов. Необходимо отметить, что временные границы субкванта на аппаратном уровне должны обладать долговременной стабильностью, т. е. оставаться неизменными на протяжении всего срока службы измерительного устройства.

Определение параметров и условий выполнения калибровки. Опорная частота. Применение в аппаратуре измерения временных интервалов опорных частот более 500 МГц оказывает существенное влияние на механизм и точность определения доли периода на концах временного интервала. Прецизионное измерение долей периода опорного генератора в начале и конце временного интервала ограничиваются не только быстродействием цифровой техники, но и способом измерения. Физически быстродействие цифровой техники с использованием многоразрядных двоичных счетчиков импульсов с ускоренным переносом ограничивается частотами 1–3 ГГц, что соответствует периоду 100–200 пс. Техническая реализация различных методов разбиения столь коротких интервалов на субкванты времени чрезвычайно сложная задача. С одной стороны, практический опыт многих авторов [5–10] в разработке подобных измерительных устройств с применением интегральных микросхем на основе кристалла FPGA (программируемая пользователем вентильная матрица) показывает, что увеличение частоты опорного генератора более 400 МГц нецелесообразно, так как в этом случае существенно усложняется схемотехническое обеспечение, а также устойчивость процесса измерения. С другой стороны, при работе на частоте менее 50 МГц требуется существенно увеличить количество субквантов, необходимых для разбиения большого периода опорной частоты. В этом случае увеличение

числа последовательно включённых звеньев задержек увеличивает нежелательное фазовое дрожание (джиттер) границ субквантов, что особенно характерно для последних звеньев цепочки. Джиттер пропорционален $\sqrt{N}$, где N – число звеньев в цепочке [3]. Таким образом, оптимальными являются измерения временных интервалов методом разбиения периода опорной частоты на субкванты времени на частотах 100–200 МГц с применением интегральных микросхем FPGA.

Субкванты. Разделение периода опорной частоты на N частей с помощью различных процедур и образования множества фиксируемых фазовых аппаратно-устойчивых состояний относительно фронта измеряемого сигнала и фронта опорного генератора подробно описаны в работе [11]. В настоящее время широко распространены дискретные фазовые интерполяторы интервала времени на базе функциональных элементов FPGA. В [3] приведены минимальные значения задержек логических элементов современных микросхем, которые соответствуют периоду 100–400 пс. Авторы настоящей статьи опробовали микросхемы Cyclone V типа 5CEFA5F23C7 (Intel, США) с опорной частотой $T_{оп}=100$ МГц. Количество последовательно соединённых элементов равнялось 60, число параллельных процессов измерений $M=50$, т. е. измерительная матрица содержала 50×60 элементов. Эквивалентный субквант времени составлял 1–8 пс.

Уменьшение временного разрешения. Временное разрешение уменьшали путём параллельного включения фазовых интерполяторов. Количество фиксированных фазовых состояний последовательно соединённых функциональных элементов одной цепи определяется из условия

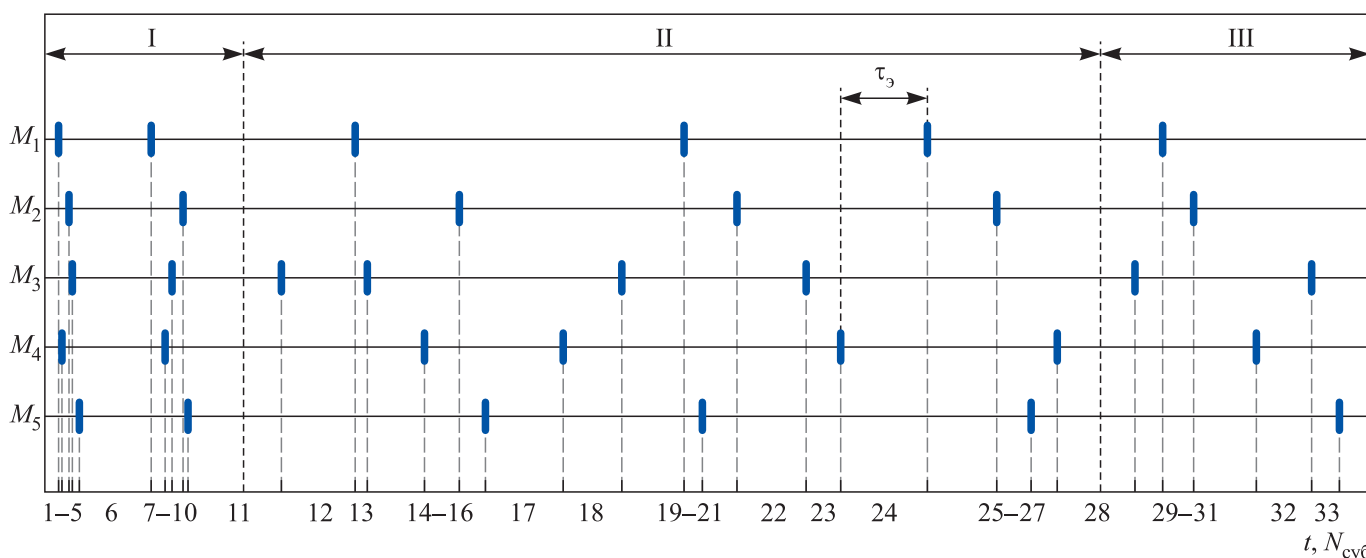


Рис. 1. Упрощённая диаграмма разбиения периода опорной частоты на эквивалентные субкванты времени:
I – зона равных задержек; II – рабочая зона; III – избыточная зона; $\tau_{суб}$ – эквивалентный субквант; M_{1-5} – цепочки задержек

Fig. 1. Simplified diagram of dividing the reference frequency period into equivalent time subquants:
I – zone of equal delays; II – working area; III – excess zone; $\tau_{суб}$ – equivalent subquantum; M_{1-5} – delay chains

превышения суммарной задержки на 10–20 % периода опорной частоты. Избыточное количество субквантов необходимо, во-первых, для гарантированного разбиения заданного периода и, во-вторых, для исключения близких по значению задержек при параллельной организации измерительного процесса в первом десятке последовательной цепи, что обусловлено идентичностью путей распространения фронта.

На рис. 1 представлена упрощённая диаграмма, которая поясняет формирование эквивалентного субкванта времени при параллельном включении цепочек задержек для измерительной матрицы 5×6. Рабочая зона II в данном случае разбивается на 18 неравнозначных эквивалентных субквантов времени t от 11 до 28 $N_{\text{суб}}$. Фактически процесс измерения заключается в фиксации фазового состояния измерительной матрицы и определении номера эквивалентного субкванта. За расчётное значение принимается середина эквивалентного субкванта времени. Алгоритм формирования временных границ эквивалентного субкванта по состоянию измерительной матрицы требует отдельного обсуждения и в данной работе не описывается.

Рассмотрим порядок интерпретации фазового состояния матрицы в начале и конце рабочей зоны (см. рис. 1, зоны I, III), когда могут появиться отрицательные значения временных границ эквивалентных субквантов или значения, большие периода опорной частоты $T_{\text{оп}}$. Значения временных границ эквивалентных субквантов времени в рабочей зоне подлежат первичной калибровке в процессе калибровки фазового интерполятора. Точность определения временных границ эквивалентных субквантов напрямую определяет погрешность измерения временных интервалов данным способом.

В работе [11] в общем виде описан принцип измерения интервалов времени между двумя импульсными сигналами A, B с применением фазового интерполятора. Результат

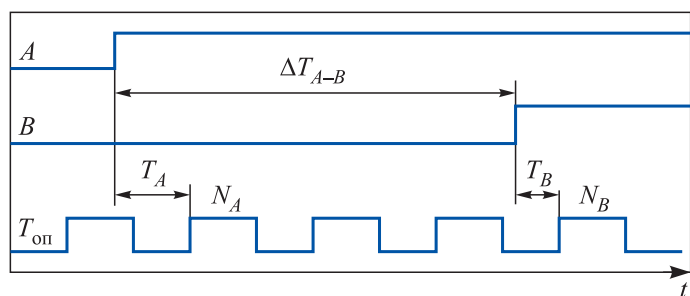


Рис. 2. Диаграмма измерения интервалов времени:

N_A, N_B – первые периоды после прихода сигналов A, B соответственно; T_A, T_B – времена между положительными фронтами A и N_A, B и N_B соответственно; $T_{\text{оп}}$ – период опорной частоты

Fig. 2. Chart for measuring time intervals:

N_A – first period after the arrival of signal A ; N_B – first period after the arrival of signal B ; T_A – time between the positive fronts A and N_A ; T_B – time between the positive fronts B and N_B ; $T_{\text{оп}}$ – reference frequency period

измерения определяется суммарным временем полных периодов $T_{\text{оп}}$ и модулем разности интерполяционных значений периодов T_A, T_B сигналов A, B :

$$\Delta T_{A-B} = (N_A - N_B) T_{\text{оп}} + |T_A - T_B|,$$

где N_A, N_B – первые периоды после прихода сигналов A, B соответственно.

Интерполяционное измерение в каждой цепочке задержек выполняется относительно положительных фронтов опорной частоты $T_{\text{оп}}$ в соответствии с диаграммой, представленной на рис. 2.

Размер измерительной матрицы. Предположим, что при постоянной температуре кристалла FPGA временные задержки распространения цифрового сигнала через последовательно соединённые логические вентили стабильны во времени. Однако задержки распространения сигналов в кристалле FPGA производителем не нормируются. Более того, при выполнении новой компиляции одного и того же проекта реальная схема никогда не повторяется и соответственно не повторяются значения задержек. Для кристалла FPGA Cyclone V типа 5CEFA5F23C7 задержка распространения в последовательной цепочке логических вентилей принимает значения от $-0,2$ до 2 нс при средней длительности субкванта времени $\Delta t_k = 300$ пс. Число элементов последовательной цепочки задержек, как было отмечено выше, определяется периодом опорной частоты $T_{\text{оп}}$ и средней длительностью субкванта. Например, для опорной частоты 100 МГц количество $N_{\text{посл}}$ последовательных элементов задержек определяется неравенством

$$T_{\text{оп}} / \Delta t_k < N_{\text{посл}} \approx 1,2 T_{\text{оп}} / \Delta t_k.$$

В рассматриваемом случае для $T_{\text{оп}} = 10$ нс оптимальным является 60 последовательно соединённых логических вентилей. При этом разрешающая способность фазового интерполятора будет соответствовать средней длительности субкванта Δt_k . При параллельном включении последовательных цепочек задержек с целью увеличения разрешения формируется матрица задержек, состоящая из последовательных цепочек M вентилей. Каждая цепочка содержит $N_{\text{посл}}$ логических вентилей. Размер матрицы по количеству цепочек M ограничивается числом вентилей на кристалле FPGA. Например, для матрицы из 60×50 элементов среднее разрешение составит $\Delta t_{60 \times 50} \approx 10 \text{ нс} / [(60 \times 50)k] \approx 4 \text{ пс}$, где $k = 0,8$ – коэффициент отсечения рабочей зоны II (см. рис. 1). Реализация данной матрицы потребует более 3000 вентилей логической матрицы. Временная стабильность (джиттер) границ задержек последних элементов в цепочках соответствует 5–6 пс [3]. Поэтому дальнейшее увеличение числа логических элементов в последовательной цепочке становится нецелесообразным в связи с ухудшением стабильности временных границ эквивалентного субкванта времени.

В большинстве случаев программируемые логические матрицы предназначены для проектирования синхронного дизайна. Производитель не регламентирует время

распространения сигналов между аппаратными элементами. Для компиляции программных проектов применяют язык VHDL. После выполнения компиляции проект приобретает вид реальной схемы на основе случайных преобразований. Каждый раз происходит новая процедура компиляции одного и того же VHDL-проекта, при этом формируется новая уникальная аппаратная реализация программного проекта с индивидуальными задержками распространения сигналов. Таким образом, разработанный программный проект на кристалле FPGA Cyclone V типа 5CEFA5F23C7 фазового интерполятора автоматически формируется с неравномерным шагом квантования. Более того не представляется возможным на программном уровне оценить задержки в последовательной цепочке.

Таким образом, после каждой процедуры компиляции необходимо подвергать первичной калибровке фазовые интерполяторы, содержащие устройства на базе кристалла FPGA. Более того, согласно результатам выполненных предварительных экспериментов один и тот же скомпилированный проект, «зашифрованный» в разные микросхемы, имеет некоторые различия временных показателей. Это свидетельствует о том, что для достижения наилучших результатов потребуется предварительная калибровка каждого кристалла FPGA.

Требования по поддержанию температуры кристалла. Для достижения наилучшего результата первичной калибровки фазового интерполятора с неравномерным шагом необходимо стабилизировать температуру кристалла FPGA с максимально возможной точностью в связи с существенной зависимостью времени распространения импульсных сигналов от этой температуры [3]. Авторы настоящей статьи экспериментально установили, что для достижения погрешности 1–2 пс определения границ эквивалентного субкванта времени при первичной калибровке необходимо поддерживать температуру ядра кристалла микросхемы в пределах $\pm 0,05$ °C. В целом при изменении температуры кристалла на 1 °C граница последнего звена задержки в последовательной цепочке из 100 звеньев изменяется на 20 пс. Поэтому при первичной калибровке и непосредственно в процессе измерения необходимо измерять и поддерживать температуру кристалла FPGA с погрешностью $\pm 0,05$ °C или применять специальные компенсационные алгоритмы.

Требования к испытательным сигналам. Авторы настоящей статьи предварительно оценили необходимые вероятностные характеристики испытательных импульсных сигналов для первичной калибровки временных границ эквивалентных субквантов. За время выполнения работ, связанных с первичной калибровкой, среднее значение положения фронта импульсного сигнала относительно фронта опорной частоты $T_{оп}$ не должно изменяться более чем на 1 пс ($\Delta t_{кв} < 1$ пс). Для исключения влияния изменения периода опорной частоты на результаты калибровки необходимо, чтобы стабильность и точность частоты превышали на один два порядка заданные значения.

Можно утверждать, что случайная составляющая времени $\Delta t_{кв}$ подчиняется нормальному закону распределения

вследствие множества влияющих факторов: фазовых шумов опорного генератора; шумов импульсного буферного усилителя сигналов 1ГцPD-5RM-B (Spectradynamics, Inc., США), входных компараторов измерительного устройства и входных устройств интегральной схемы FPGA. Суммарное среднее квадратическое отклонение (СКО) положения фронта испытательного сигнала относительно фронта опорной частоты составило 9 пс, что на порядок больше требуемого значения погрешности определения границ субквантов времени. Применение статистических методов обработки в конечном итоге требует увеличения количества испытаний минимум на два порядка.

В настоящее время отсутствуют технические средства, которые формировали бы импульсные сигналы с шагом изменения задержки и выходным джиттером менее 1 пс. Поэтому прецизионную первичную калибровку необходимо выполнять методами статистической обработки стационарным в узком смысле испытательным сигналом (математическое ожидание и дисперсия временного положения фронтов которого должны быть постоянными и не зависящими от времени).

Расчёт времени калибровки. Предварительную калибровку выполняли с применением секундных импульсных сигналов 1 Гц. Общее время выполнения калибровки рассчитали исходя из следующих условий: время одного измерения $T_{изм} = 1$ с; период опорной частоты $T_{оп} = 10$ нс; шаг квантования $\Delta t_{кв} = 1$ нс; требуемое число испытаний за один шаг квантования $K = 10^2$.

Общее время $T_{к}$ калибровки определяли по формуле

$$T_{к} = T_{оп} T_{изм} K / \Delta t_{кв} = 1[с] \cdot 10^2 \cdot 10^4[нс] / 1[нс] \approx 1,2 \text{ сут.}$$

С целью набора статистических данных калибровку выполняли в течение двух суток. Таким образом, на суточном интервале наблюдения калибруемая аппаратура должна иметь относительную нестабильность $\sigma_y(\tau)$ единиц времени и частоты не более $5 \cdot 10^{-13}$.

Материально-техническая база. Для решения задач предварительной калибровки наиболее приемлемы с точки зрения технических характеристик эталонные комплексы времени и частоты. В рассматриваемом случае использовали Государственный вторичный эталон единиц времени и частоты ВЭТ 1-7, находящийся в Дальневосточном филиале ВНИИФТРИ (г. Хабаровск). К основным метрологическим характеристикам ВЭТ 1-7 относят суммарную погрешность $S_{\Sigma} \leq 10^{-14}$ (при $\tau_{н} = 10$ сут) и относительную нестабильность единиц времени и частоты шкалы $TA(Km) \sigma_y(\tau) \leq 5 \cdot 10^{-15}$ (при $\tau_{н} = 10 \dots 30$ сут), определённые в течение $\tau_{н} = 1$ год, а также пределы допускаемых смещений шкалы координированного времени $UTC(Km)$ относительно национальной шкалы времени $\Delta T_{UTC(SU) - UTC(Km)} \pm 30$ нс. Метрологические характеристики ВЭТ 1-7 многократно превышают значения, требуемые для проведения первичной калибровки фазового интерполятора методом статических испытаний.

Калибровка фазового интерполятора с неравномерным шагом. На базе Государственного вторичного эталона

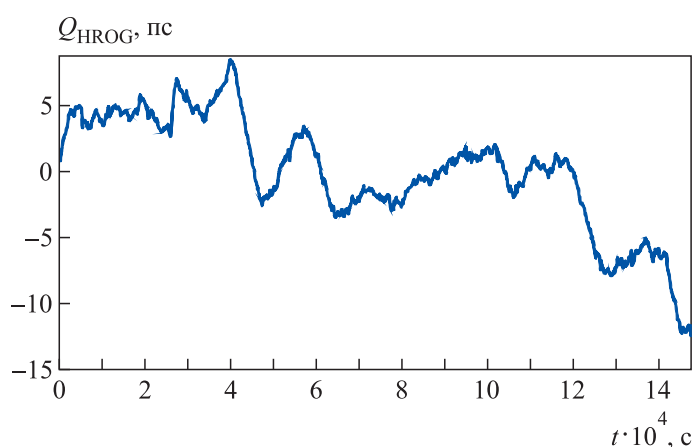


Рис. 3. Фазовый сдвиг генератора HROG-5 при отстройке частоты сигнала

Fig. 3. The magnitude of the phase shift of HROG-5 when tuning the signal frequency

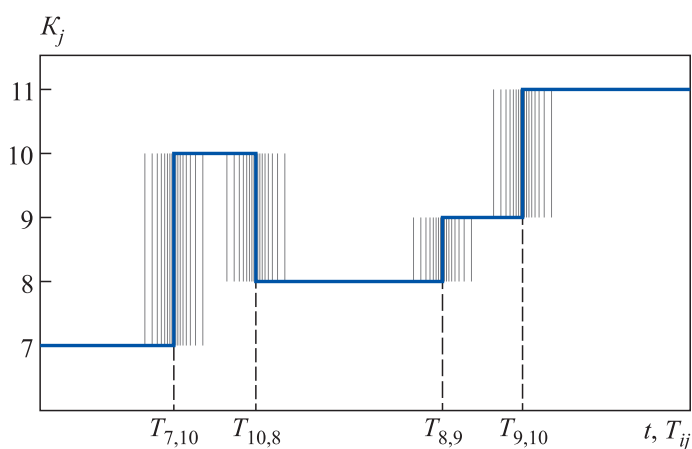


Рис. 4. Переходный процесс калибровки одной цепочки задержек

Fig. 4. Transient calibration of one delay chain

времени и частоты ВЭТ 1-7 авторы настоящей статьи реализовали аппаратно-программный комплекс первичной калибровки фазового интерполятора. В качестве опорного генератора выбрали наиболее стабильный водородный стандарт времени и частоты эталонного комплекса. Поправку к частоте опорного генератора, сформированную при сравнении с Государственным первичным эталоном времени и частоты ГЭТ 1-2012, учитывали в последующих расчётах в разработанной компьютерной программе.

На выходе водородного стандарта частоты и времени Ч1-75А формируется импульсный сигнал 1 Гц, который поступает на измеритель временных интервалов. Импульсный сигнал частотой 1 Гц водородного стандарта синхронизирован с одним из периодов выходной частоты генератора отстроек 5 МГц, поэтому при небольшой отстройке частоты с помощью генератора отстроек можно

получить импульсные сигналы со средним изменением времени между фронтами менее 0,1 пс/с. Необходимое значение отстройки частоты рассчитали исходя из следующих условий:

растрейка ΔF частоты должна обеспечить определение границ устойчивого фазового состояния интерполятора с погрешностью не более 1–2 пс;

интервал изменения временных задержек должен содержать 2–3 периода опорной частоты, т. е. 20–30 нс;

частота испытаний должна составлять 1 Гц;

время проведения первичной калибровки не должно превышать двух суток.

Указанные условия соответствуют относительной расстройке частоты 10^{-13} , поэтому фаза входного импульсного сигнала по отношению к фронту опорной частоты должна смещаться в среднем на 0,1 пс/с. Такой механизм изменения частоты в рассматриваемом случае обеспечивает генератор отстроек по фазе и частоте HROG-5 (Spectradynamics Inc., США) со следующими характеристиками: разрешение по отстройке частоты $1 \cdot 10^{-19}$; диапазон изменения относительной частоты $\pm 2 \cdot 10^{-7}$; нестабильность частоты при отстройке $1 \cdot 10^{-12}$ за 1 с, $9 \cdot 10^{-14}$ за 10 с, $9 \cdot 10^{-15}$ за 100 с, $4 \cdot 10^{-15}$ за 1000 с.

Для повышения точности калибровки программно компенсировали отклонения фазы на выходе генератора отстроек от заданных требований на основании данных фазового компаратора Time Tech 10265 (TimeTech GmbH, Германия) начальной погрешностью 0,2 пс. На рис. 3 показан фазовый сдвиг генератора HROG-5 при отстройке частоты сигнала, откуда следует, что фазовый сдвиг между опорным сигналом и испытательным сигналом 1 Гц во время эксперимента максимально может изменяться на 20 пс, что существенно влияет на результаты первичной калибровки. В результате проведённых исследований определили функцию плотности вероятности переходного процесса от одного значения звена задержки к последующему, т. е. от одного субкванта времени к другому. СКО переходного процесса составило 13–20 пс. За один переходной процесс необходимо проводить 400 или 500 испытаний.

На рис. 4 представлен результат калибровки цепочки задержек из пяти элементов. Переходной процесс состоит из неравномерного ряда случайных фазовых состояний интерполятора, соответствующих нарастающей последовательности цепочки задержек. Однако ввиду сложной структуры временных задержек в интегральной схеме возможны непоследовательные переходы фазовых состояний. Более сложные комбинации возникают, если значения задержек в линейной цепочке сравнимы с длительностью переходного процесса. Исследование данного вопроса и алгоритмов вычисления значений границ субквантов времени требует отдельного обсуждения.

На рис. 5 представлен ряд фазовых состояний интерполятора при переходе от состояния K_j к состоянию K_{j+n} в одной цепочке задержек. Возможны варианты, при которых n отлично от единицы, как было описано выше. Для оценки

момента фазового перехода применяли методику, которая заключается в формировании интегральной функции распределения частоты фазовых переходов. Под частотой фазового перехода понимали величину, обратную временному интервалу между соседними фазовыми состояниями:

$$\Delta\Phi_{j,j+n} = (t_{j+n} - t_j)^{-1}.$$

Частота фазового перехода может принимать значения $(0,03-10,00) \cdot 10^{-12}$ Гц. Максимальная частота фазового перехода определяется минимальным испытательным смещением времени 0,1 пс при равновероятном состоянии интерполятора в состояниях $j, j+n$.

Интегральная функция строится на основании результатов испытаний прямого перехода фазового состояния от K_j к K_{j+n} , так и обратного перехода. Применение прямого и обратного перехода увеличивает количество испытаний в два раза. По оси времени t последовательно строится интегральная функция частоты фазовых переходов $\Delta\Phi_{j,j+n}$ в момент времени, соответствующий середине интервала $t_{j+n} - t_j$. На завершающем этапе для удобства статистической обработки интегральная функция нормируется. В общем случае функция описывается уравнением

$$F(t) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(-\frac{(t - T_{i,j})^2}{\sqrt{2}\sigma_{i,j}^2} \right) \right],$$

где $\operatorname{erf} t = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t e^{-t^2} dt$ – интеграл вероятности; $T_{i,j}$ – значение времени, которое соответствует наилучшей оценке времени исследуемого фазового перехода; $\sigma_{i,j}$ – СКО нормального закона распределения.

При обработке результатов испытаний использовали математический аппарат MATLAB, в частности экспериментально полученную интегральную функцию конкретного фазового перехода обрабатывали с использованием команды FMINSEARCH для поиска минимума функции нескольких переменных. В результате определили оптимальные значения $T_{i,j}$ времени перехода фазового интерполятора от i -го значения к j -му, а также значение $\sigma_{i,j}$ (см. рис. 5). Фактически значение $T_{i,j}$ по оси времени t соответствует вероятности 0,5 перехода от состояния K_j к состоянию K_{j+n} фазового интерполятора (рис. 6).

Экспериментально установили, что для предварительной калибровки в сигналах опорной частоты не должны присутствовать низкочастотные спектральные составляющие, так как наличие этих составляющих приводит к изменению периода опорной частоты и нарушает повторяемость калибровки. Так, появление спектральной составляющей 50 МГц на уровне 50 дБ опорного сигнала 100 МГц приводит к формированию двух последовательных периодов опорной частоты, отличающихся на 15 пс,

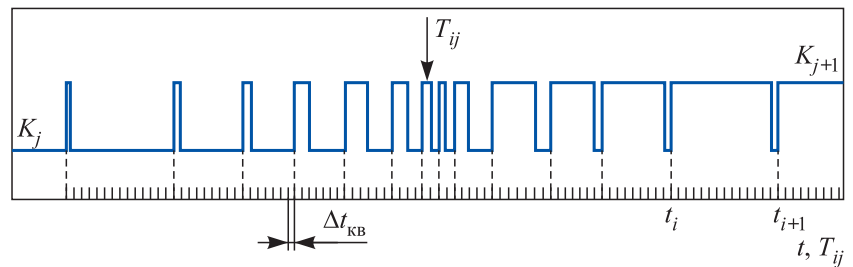


Рис. 5. Фазовые состояния интерполятора при переходе от состояния K_j к состоянию K_{j+n}

Fig. 5. Phase states of the interpolator in the transition from K_j to K_{j+n} state

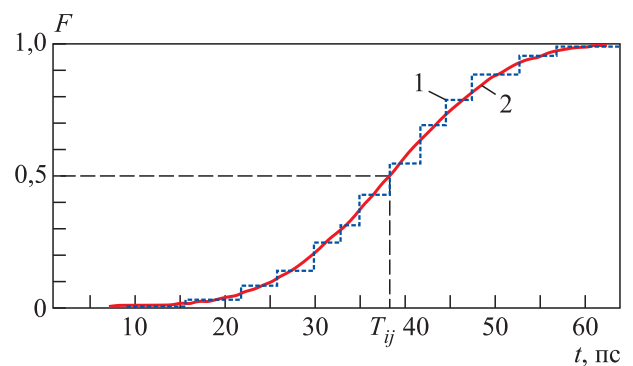


Рис. 6. Интегральная функция распределения фазового перехода интерполятора от состояния K_j к состоянию K_{j+n} :
1 – экспериментальная кривая; 2 – аппроксимированная кривая

Fig. 6. Example of an integral function of the phase transition of an interpolator from K_j to K_{j+n} state
1 – experimental curve; 2 – approximated curve

что существенно усложняет статистическую обработку. Для устранения данного недостатка в цепь сигнала опорной частоты 5 МГц от стандарта частоты и времени включили очиститель-умножитель – управляемый умножитель частоты Si53/44 (Silicon labs, США). Данное устройство имеет следующие характеристики: ультранизкий джиттер 90 фс; входные частоты от 8 кГц до 750 МГц; выходные частоты от 100 Гц до 1028 МГц. Управляемый множитель Si53/44 вырабатывает очищенный от помех сигнал, уменьшает джиттер и одновременно с этим выполняет роль умножителя частоты, формируя опорную частоту 100 МГц из входной частоты 5 МГц.

Дополнительно для уменьшения джиттера были применены высокоскоростные монолитные сверхбыстрые кремниково-германиевые SiGe компараторы на микросхеме типа HMC674LP3E (Analog devices, США) со следующими техническими характеристиками: эквивалентная ширина полосы входного сигнала 9,3 ГГц; задержка распространения 85 пс; длительность фронтов 10 пс; среднеквадратичное значение случайного джиттера 0,2 пс; минимальная длительность импульса входного сигнала 60 пс.

Первичную калибровку производили на изготовленных макетах измерителей интервалов времени ИВИ 01 (разработчик – Дальневосточный филиал ВНИИФТРИ). Достоверность калибровки и применяемых алгоритмов подтверждена повторными (в течение нескольких месяцев) калибровками временного положения фазовых переходов интерполятора. Расхождение результатов первой калибровки и последующих калибровок находилось в пределах 1–1,5 пс, что подтверждает правильность выбранных аппаратных решений и алгоритмов статистической обработки.

Заключение. Наиболее оптимальными для первичной калибровки являются вторичные эталоны единиц времени и частоты. Разработанный аппаратно-программный комплекс для калибровки временных границ эквивалентных субквантов с погрешностью 2 пс позволяет создавать средства прецизионных измерений временных интервалов с суммарной погрешностью 12 пс.

Выбранная опорная частота 100–200 МГц необходима для разбиения периода опорной частоты на субкванты времени при измерении временных интервалов с использованием интегральных микросхем FPGA. Оптимальное количество последовательно соединённых логических вентилей для периода 10 нс опорной частоты соответствует 60 элементам, высота измерительной матрицы FPGA ограничена количеством вентилей на кристалле. Экспериментально установлено, что в процессе первичной калибровки необходимо поддерживать температуру кристалла микросхемы FPGA в пределах $\pm 0,05$ °C, при выходе температуры за заданные границы необходимо применять компенсационные алгоритмы.

Расчётное значение СКО (9 пс) фронта испытательно-го сигнала относительно фронта опорной частоты значительно больше требуемой точности определения границ субквантов времени, поэтому требуется применять статистические методы обработки, что приводит к увеличению числа испытаний на два порядка. Расчётное время одной калибровки составляет около двух суток. Установленное значение (менее 20 пс) фазового сдвига между опорным и испытательным сигналом 1 Гц требует специального учёта. Оптимальное время перехода фазового интерполятора определено по экспериментальной интегральной функции конкретного фазового перехода.

Список литературы

1. Лепёхина Т. А., Николаев В. И. // Материалы 26 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО 2016)», Севастополь, 4–10 сентября 2016. Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2016. С. 2711–2715.
2. Юсупалиев У., Радомский Н. В., Шутеев С. А., Коквин В. А., Юсупалиев П. У. Измерение интервала времени с пикосекундным разрешением для системы «лазер – времяпозиционно-чувствительный детектор излучения» // Прикладная физика. 2009. № 5. С. 113–118.
3. Калинов Д. Г., Римлянд В. И., Калинов Г. А., Грунин А. П., Мигунов Д. С. Оценка влияния основных параметров

FPGA серии CYCLONE V при проектировании цифровых преобразователей ВРЕМЯ-КОД // Ученые заметки ТОГУ. 2017. Т 8. № 3. С. 372–377.

4. Безменов И. В., Блинов И. Ю. Теоретические основы построения моделей для описания современных шкал времени и стандартов частоты: монография. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2015. 529 с.
5. Song J., An Q., Liu S., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, February 2006, vol. 53, no. 1, pp. 236–241. DOI:10.1109/TNS.2006.869820
6. Favi C., Charbon E., *International Symposium on Field Programmable Gate Arrays, 22–24 February 2009, Monterey, California, USA*, 2009, pp. 113–120. DOI: 10.1145/1508128.1508145
7. Wang J., Liu S., Shen Q., Li H., and An Q., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, April 2010, vol. 57, no. 2, pp. 446–450. DOI: 10.1109/TNS.2009.2037958
8. Menninga H., Favi C., Fishburn M. W., and Charbon E., *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 23–29 October 2011, Valencia, Spain*, 2011, pp. 1515–1521. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154362
9. Chen Y.-H., Lu C.-W., Chang T.-Y., and Hsia C., *International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation, 25–28 August 2012, Sanya, China*, 2012, pp. 44–47. DOI: 10.1109/MSNA.2012.6324513
10. Chen Y.-H., *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 19–23 May 2013, Beijing, China, 2013, pp. 2432–2435. DOI: 10.1109/ISCAS.2013.6572370
11. Чулков В. А. Интерполирующие устройства синхронизации и преобразователи информации. М.: Физмалит, 2010, 324 с.

References

1. Lepekhina T. A., Nikolaev V. I., *SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tekhnologii (KRYMIKO 2016)*, *Proceeding of the 26th International crimean conference*, Sevastopol, September 4–10, 2016, Sevastopol, Sevastopol state university Publ., 2016, pp. 2711–2715 (in Russian).
2. Yusupaliev U., Radomsky N. V., Shuteev S. A., Kokovin V. A., Yusupaliev P. U., *Applied physics*, 2009, no. 5, pp. 113–119.
3. Kalinov D. G., Rimlyand V. I., Kalinov G. A., Grunin A. P., Migunov D. S., *Ehlektronnoe nauchnoe izdanie, Uchenye zametki TOGU*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 372–377 (in Russian).
4. Bezmenov I. V., Blinov I. Yu., *Teoreticheskie osnovy postroeniya modelei dlya opisaniya sovremennykh shkal vremeni i standartov chastoty: monografiya*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2015, 529 p. (in Russian).
5. Song J., An Q., Liu S., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, February 2006, vol. 53, no. 1, pp. 236–241. DOI:10.1109/TNS.2006.869820
6. Favi C., Charbon E., *International Symposium on Field Programmable Gate Arrays, 22–24 February 2009, Monterey, California, USA*, 2009, pp. 113–120. DOI: 10.1145/1508128.1508145
7. Wang J., Liu S., Shen Q., Li H., and An Q., *IEEE Transactions on Nuclear Science*, April 2010, vol. 57, no. 2, pp. 446–450. DOI: 10.1109/TNS.2009.2037958

8. Menninga H., Favi C., Fishburn M. W., and Charbon E., *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 23–29 October 2011, Valencia, Spain, 2011*, pp. 1515–1521. DOI: 10.1109/NSSMIC.2011.6154362

9. Chen Y.-H., Lu C.-W., Chang T.-Y., and Hsia C., *International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation, 25–28 August 2012, Sanya, China, 2012*, pp. 44–47. DOI: 10.1109/MSNA.2012.6324513

10. Chen Y.-H., *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 19–23 May 2013, Beijing, China, 2013, pp. 2432–2435. DOI: 10.1109/ISCAS.2013.6572370

11. Chulkov V. A., *Interpoliruyushchie ustroystva sinkhronizatsii i preobrazovately informatsii*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2010, 324 p. (in Russian).

Дата поступления: 19.12.2019.

Дата принятия: 10.03.2020.

Pre-calibration of the phase interpolator of a precision time interval meter

Denis G. Kalinov¹, Vladimir I. Rimlyand²

¹Far Eastern Branch of Russian metrological institute of technical physics and radio engineering (VNIIFTRI), Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: kalinov.d@dfvniiftri.ru

²Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation, e-mail: riml@pnu.edu.ru

The problems of precision measurements of time intervals are considered, the results of which are necessary, for example, to assess the metrological characteristics of the structural complexes of space navigation systems. A precision time interval meter has been designed. The relationship between the meter readings and the size of the measured value is established. A technique for preliminary calibration of a phase interpolator with an uneven quantization step from the composition of a precision time interval meter was developed and tested. The optimal value of the reference frequency was selected and the optimal size of the measuring matrix, consisting of logic gates connected in series, was calculated. The degree of influence of the crystal temperature of the FPGA integrated circuit on the operation of the phase interpolator is determined. The requirements for test signals were developed and the possibility of using the reference signals of the secondary standards of time and frequency (for example, the State secondary standard of units of time and frequency VET 1-7) during the preliminary calibration of the phase interpolator was evaluated. Special software has been developed for determining the boundaries of the sub-quanta of the phase interpolator with a resolution of one picosecond, and the probability density functions of the transition process from one subquantum to the next are calculated. The requirements for the spectral composition of the frequency of the reference signal are given and the frequency detuning of the test signal relative to the reference is determined. Verification of the developed methodology for preliminary calibration of the temporal position of the phase transitions of the interpolator was carried out by repeated calibrations and comparison of the results.

Key words: calibration, time interval, phase transition, delay line, hardware-software complex.

Структурные методы повышения точности измерений расхода веществ в трубопроводах

Г. Н. Ахобадзе

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация,
e-mail: ahogur@yandex.ru

Рассмотрена актуальная в эпоху цифровой трансформации технологических процессов в промышленности и науке проблема разработки и создания интеллектуальных датчиков расходов сыпучих и жидких веществ, транспортируемых по трубопроводам. С этой целью в статье предложены новые подходы к повышению точности измерений микроволновых расходомеров. С учётом характеристик распространяющихся по трубопроводу электромагнитных волн проведён анализ волны, рассеянной на неоднородностях контролируемой среды. Выявлены особенности преобразования поляризованной рассеянной волны, ограничивающие геометрические размеры трубопровода и оптимизирующие значения полезного рассеянного сигнала. Обоснована целесообразность съёма информационного сигнала с ортогональной поляризации рассеянной волны и через направленный ответвитель. Разработана методика оценки точности измерений с привязкой отношения сигнал-шум на входе устройства обработки. Показано, что результаты исследований можно использовать в криогенном машиностроении для измерений объёмного и массового расходов жидких криопродуктов.

Ключевые слова: неоднородность, дифракция, рассеивающий объём, шумовая модуляция, электромагнитная волна, съём сигнала, поляризация, рассеянная волна.

Важное значение для автоматизации многих технологических процессов и управления ими имеет получение точной и непрерывной информации о расходе различных сред, протекающих по трубопроводам. В настоящее время при измерениях расхода веществ в трубопроводах наиболее популярен микроволновый метод, основанный на использовании характеристик распространения электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона [1]. Однако реализованные на базе этого метода измерители по точности не всегда удовлетворяют современным требованиям. Для повышения точности измерений расхода автор настоящей статьи разработал новые принципы построения первичных преобразователей микроволновых измерителей расхода жидких и сыпучих сред в трубопроводах.

Для оценки точности измерений расхода рассмотрим характер распространения электромагнитной волны по трубопроводу и сравним погрешности, обусловленные различными способами съёма с трубопровода полезного информационного сигнала. В любом однородном круглом волноводе (трубопроводе), заполненном средой с неоднородностями (частицами), напряжённость E_z электрического поля электромагнитной волны, распространяющейся в направлении оси Z , можно записать в виде [2]:

$$E_z = E_m e^{-i\omega t - \gamma z},$$

где E_m – амплитуда напряжённости электрического поля электромагнитной волны; ω – круговая частота колебаний;

t – время; γ – постоянная распространения рассматриваемого волнового процесса.

Будем считать, что среда неподвижна. Тогда волна, рассеянная её частицами, будет распространяться во все стороны волновода. Амплитуда волны, идущей к началу координат, приобретает в точке $z=0$ значение, которое равно векторной сумме волн, рассеянных всеми частицами среды:

$$E_0 = E_m \int_0^{\infty} e^{-i\omega t - 2\gamma z} dz = E_m e^{-i\omega t} \int_0^{\infty} e^{-2\gamma z} dz.$$

Предполагается, что каждый элементарный объём среды, внутри которого расположены частицы, переизлучает с некоторой фазой, не зависящей от положения объёма в трубопроводе [3].

В теории дифракции известен интеграл Френеля [4]. Рассмотрим поведение этого интеграла как функцию верхнего предела, т. е. ограничим область переизлучения:

$$J_z = \int_0^z e^{-2\gamma z} dz. \quad (1)$$

Для оценки амплитуды рассеянного поля исследуем интеграл (1). В работе [5] показано, что подобный интеграл представляет собой гармоническое колебание и иллюстрируется спиралью Корню. Поэтому в формуле (1) с ростом z в подынтегральном выражении будет постепенно изменяться фаза и амплитуда, причём амплитуда начнёт уменьшаться

по экспоненте, а фаза – линейно. В итоге J_z будет представлять векторную сумму, максимальное значение которой будет достигнуто при $2\beta z = \pi(2n+1)$, т. е. оптимальная длина рассеивающего объёма соответствует нечётному числу четвертей волны, где β – фазовая постоянная, $n=1, 3, \dots$. Таким образом, зависимость амплитуды рассеянной волны носит резонансный характер [6], что является особенностью рассмотренного случая.

Рассмотрим другой предельный случай решения, когда фаза переизлучаемой волны может равновероятно принимать значение в интервале $-\pi/2 \dots \pi/2$. В этом случае все сигналы статистически независимы и, как следует из работы [7], складываются мощности сигналов, а не векторы. Мощность рассеянного сигнала в точке $z=0$ в этом случае запишем как

$$P_0 = \int_0^{\infty} E^2 e^{-4\alpha z} dz = E^2 [4\alpha(1 - e^{-4\alpha z})]^{-1}, \quad (2)$$

где E – амплитуда электрического поля рассеянного сигнала; α – коэффициент затухания.

Из формулы (2) следует, что с увеличением области переизлучения сигнал растёт. Анализ полученных результатов показывает, что в первом случае для получения максимального полезного сигнала целесообразно ограничить длину рассеивающего участка, исходя из соотношения

$$z_p = \lambda_b / [4(2n+1)].$$

где z_p – длина рассеивающего участка; λ_b – длина волны в трубопроводе.

Приведённые выше исследования показывают, что микроволновый первичный преобразователь расхода можно выполнить на базе отрезка трубопровода (круглого волновода), в котором для ограничения рассеивающего объёма введён фильтр, отражающий или поглощающий волну [8]. При этом фильтры, выполненные в виде местного сужения сечения трубопровода, крупноячейной сетки и поперечного штыря в трубопроводе, будут отражающими, а фильтры, сделанные как продольные перегородки из поглощающего материала и участка трубопровода, на стенку которого нанесено поглощающее покрытие, – поглощающими.

Для движущейся среды переизлучаемая волна будет иметь другую частоту и фазовую постоянную и, так как скорость распространения электромагнитной волны в трубопроводе значительно превышает скорость движения среды, характер распространения электромагнитной волны качественно не будет отличаться от случая неподвижной среды.

Эффект преобразования поляризации волны в трубопроводе. Каждая неоднородность, не являясь симметричной, искажает структуру поля таким образом, что появляется компонента, перпендикулярная плоскости поляризации падающей волны [9]. С другой стороны, волна с такой поляризацией будет преобразовываться на тех же неоднородностях

в волну с первичной поляризацией, т. е. между двумя волнами будет происходить обмен энергией [10].

Рассмотрим пример. Пусть c – коэффициент преобразования мощности волн. Обозначим P_1 мощность падающей волны, P_2 – мощность порождённой волны с ортогональной поляризацией. В трубопроводе на отрезке пути dz баланс энергии имеет вид

$$\Delta P_1 = -cP_1 + cP_2 - \alpha P_1;$$

$$\Delta P_2 = cP_1 - cP_2 - \alpha P_2,$$

где $\alpha P_1, \alpha P_2$ – потери энергии на поглощение в среде; cP_1, cP_2 – мощности, преобразуемые в P_2 и P_1 соответственно.

При $dz \rightarrow 0$ перейдём к системе дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} dP_1/dz = (-c - \alpha)P_1 + cP_2; \\ dP_2/dz = cP_1 - (c + \alpha)P_2. \end{cases} \quad (3)$$

Для упрощения обозначим $c + \alpha = a$. Тогда систему (3) запишем в виде

$$\begin{cases} dP_1/dz = -aP_1 + cP_2; \\ dP_2/dz = cP_1 - aP_2. \end{cases} \quad (4)$$

Характеристическое уравнение системы дифференциальных уравнений (4) имеет вид

$$\begin{pmatrix} (-a-b), c \\ c, (-a-b) \end{pmatrix} = (a+b)^2 - c^2 = b^2 + 2ab + a^2 - c^2 = 0.$$

Найдём корни этого уравнения:

$$b_{1,2} = -a \pm \sqrt{c^2} = -a \pm c.$$

При граничном условии $P_2 = 0$ и $z = 0$ решение системы (4) даёт возможность прийти к заключению, что зависимость P_{2z} от z имеет максимальное значение, для определения которого следует продифференцировать выражение

$$P_{2z} = (P_0/2)e^{-az}(1 + e^{-2cz}).$$

В результате получим

$$\begin{aligned} d/dz(e^{-az} - e^{-2cz - az}) &= -ae^{-az} + (2c + a)e^{-2cz - az} = \\ &= e^{-az}[-a + (2c + a)e^{-2cz}]. \end{aligned}$$

Тогда уравнение для нахождения корня данного выражения примет вид

$$-a + (2c + a)e^{-2cz} = 0;$$

$$e^{-2cz} = a/(2c + a). \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что

$$2cz = \ln(2c + a)/a;$$

$$z_{\text{опт}} = \ln(2c + a)^{-1/2} / a.$$

Полученный результат показывает, что существует оптимальное значение $z_{\text{опт}}$, при котором P_2 достигает максимума.

Таким образом, из исследования поляризации электромагнитной волны в трубопроводе следует, что при построении первичного преобразователя расхода его размеры целесообразно ограничить значением $z_{\text{опт}}$, так как увеличение или уменьшение этих размеров может привести к уменьшению полезно рассеянного сигнала, что в итоге приведёт к снижению точности функционирования в целом микроволнового измерителя.

Анализ точности измерений и пути её повышения.

Анализ работы первичных сверхвысокочастотных преобразователей расхода показывает, что эффективный и рациональный съём рассеянного сигнала с трубопровода, обеспечивающий увеличение отношения сигнал–шум на входе аппаратуры обработки, позволяет создать первичный преобразователь с высокой точностью измерений [11]. Для подтверждения этого выясним возможности получения максимального отношения сигнал–шум и оценим точность,

достигаемую при различных способах съёма полезного сигнала с трубопровода, по которому протекает контролируемая среда.

Пусть $S_p(\omega)$ – спектральная плотность рассеянного сигнала; $S_n(\omega)$ – спектральная плотность сигнала прямого прохождения (сигнал помехи); $K(\omega)$ – коэффициент передачи фильтра обработки, например доплеровского сигнала о расходе. В таком случае мощность полезного сигнала на выходе фильтра обработки определим как

$$P_p = \pi^{-1} \int_0^\infty S_p(\omega) [K(\omega)]^2 d\omega. \quad (6)$$

Тогда мощность сигнала помехи на выходе фильтра обработки примет вид

$$P_n = \pi^{-1} \int_0^\infty S_n(\omega) [K(\omega)]^2 d\omega. \quad (7)$$

Отношения (6), (7) определяют относительную погрешность δ измерений, например, скорости потока (объёмного расхода):

$$\delta = P_n / P_p. \quad (8)$$

Таким образом, из формулы (8) следует, что повысить точность измерений можно следующими способами:

выбор оптимального фильтра для минимизации отношения

$$\frac{S_n(\omega) [K(\omega)]^2 d\omega}{S_p(\omega) [K(\omega)]^2 d\omega},$$

повышение мощности сигнала помехи вследствие рационального конструирования первичного преобразователя.

Поскольку создание оптимального фильтра связано с большими трудностями, то для уменьшения мощности сигнала помехи (увеличения отношения сигнал–шум) наиболее перспективно рациональное конструирование первичного преобразователя расхода.

Съём сигнала с ортогональной поляризацией. На основе проведённых исследований волны ортогональной поляризации [12] запишем в обобщённом виде выражение для мощности P волны при её распространении вдоль трубопровода:

$$P = P_0 e^{-az} (1 - e^{-cz}), \quad (9)$$

где P_0 – амплитуда мощности.

Сигнал помехи, распространяясь по трубопроводу, приобретает, как правило, шубообразную модуляцию [13], и глубина такой модуляции m нарастает по мере прохождения трубопровода по закону

$$m = 1 - e^{-\beta z},$$

где β – коэффициент, зависящий от неоднородностей среды и параметров её движения.

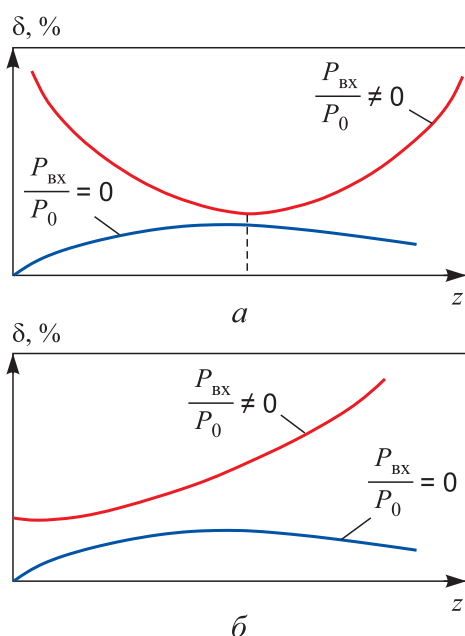


Рис. 1. Зависимость относительной погрешности δ от расстояния z между точками ввода и вывода электромагнитного сигнала (a) и при съёме сигнала непосредственно с трубопровода (b)

Fig. 1. The relationship between the relative error and the distance between the input and output points of the microwave signal (a) and during the signal collection directly from the pipeline (b)

В этом случае сигнал помехи будет определяться переменной составляющей

$$P_{\text{пер}} = P_m m = P_0 e^{-\alpha z} (1 - e^{-\beta z}). \quad (10)$$

Тогда отношение сигнал-шум на выходе первичного преобразователя согласно формулам (9), (10) запишем как

$$\delta = 1 - e^{-\beta z}.$$

На входе аппаратуры обработки действуют напряжения помех в виде тепловых шумов и наведённые электродвижущие силы (действие сторонних сил на участке цепи) от источников электромагнитных полей [14].

Пусть мощность этой помехи составит $P_{\text{вх}}$, а суммарная мощность помех

$$P_{\Sigma} = P_{\text{пер}} + P_{\text{вх}}.$$

Тогда для отношения сигнал-шум на входе аппаратуры обработки получим равенство

$$\delta = (1 - e^{-\beta z}) + (P_{\text{вх}}/P_0) [e^{\alpha z} / (1 - e^{-\beta z})]. \quad (11)$$

Анализ выражения (11) показывает, что для погрешности δ существует значение $z_{\text{опт}}$, при котором достигается минимум δ . Зависимость между относительной погрешностью δ и z показана на рис. 1, а.

Проведём оценку относительной погрешности в случае, когда сигнал снимается непосредственно с трубопровода. Запишем выражения для мощности полезного сигнала P_p , мощности сигнала помехи прямого прохождения P_d и отношения сигнал-шум δ :

$$P_p = P_0 e^{-\alpha z};$$

$$P_d = P_0 e^{-\alpha z} (1 - e^{-\beta z});$$

$$\delta = (1 - e^{-\beta z}).$$

Если на входе аппаратуры обработки мощности присутствует помеха, то относительная погрешность примет вид

$$\delta = (P_{\text{вх}}/P_0) e^{\alpha z} + (1 - e^{-\beta z}). \quad (12)$$

На рис. 1, б показано изменение δ от z согласно формуле (12) при съёме сигнала непосредственно с трубопровода. Из анализа предложенного способа съёма сигнала следует, что оптимальные условия для построения первичного преобразователя расхода реализуются, если расстояние между точками ввода в трубопровод и вывода из него сигналов будет $z_{\text{опт}}$, определяемое из формулы (11). Расчётная характеристика, рассчитанная из (11), представлена на рис. 2, из которого следует, что наименьшая погрешность наблюдается при $z_{\text{опт}} = 0,6$ м.

Рис. 2. Расчётная зависимость погрешности δ от расстояния z между точками ввода и вывода электромагнитного сигнала

Fig. 2. The estimated characteristic showing the relationship between the error and the distance between the input and output points of the electromagnetic signal

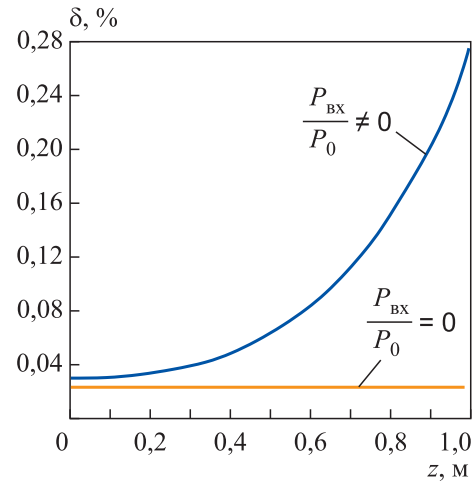
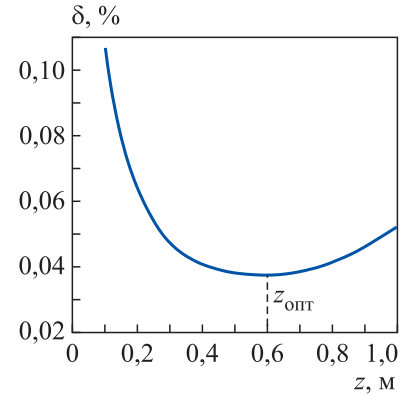


Рис. 3. Зависимость погрешности δ от расстояния z между точками ввода и вывода электромагнитного сигнала при коэффициенте направленности $D = 32$ дБ, $\alpha = 0,1$ дБ/м, $P_{\text{вх}}/P_0 = 0,5$

Fig. 3. The nature of the relationship between the error and the directivity factor and the distance between the input and output points of the electromagnetic signal $D = 32$ dB, $\alpha = 0,1$ dB/m, $P_{\text{вх}}/P_0 = 0,5$

Съём сигнала через направленный ответвитель. В случае съёма сигнала через направленный ответвитель на вход фильтра обработки поступает сигнал, улавливаемый направленным ответвителем только с одного направления [15].

Пусть коэффициент направленности ответвителя D , т. е. коэффициент деления мощности – относительная величина, измеряемая в децибелах. Тогда с учётом переходного ослабления направленного ответвителя спектральная плотность сигнала помехи уменьшается в D раз [16, 17]. Поскольку направленный ответвитель выделяет волну, движущуюся только с одного плеча, а волны полезного сигнала и помехи идут с других плеч направлений, выигрыш в отношении сигнал-шум будет равен коэффициенту направленности.

Пусть мощность полезного сигнала, улавливаемого направленным ответвителем

$$P_p = P_0 e^{-\alpha z}.$$

Тогда мощность помехи, подавленной направленным ответвителем в зависимости от коэффициента направленности, можно выразить как

$$P_n = P_0 e^{-\alpha z} D^{-1}.$$

Запишем выражение для суммарной мощности помех:

$$P_\Sigma = P_{\text{пер}} + P_{\text{вх}}.$$

Отношение суммарной мощности помех к мощности полезного сигнала представим как

$$\delta = P_\Sigma / P_p = P_{\text{вх}} e^{\alpha z} / P_0 + 1/D. \quad (13)$$

Сравнение со случаем непосредственного съёма сигнала показывает, что разница в выражениях обусловлена слагаемыми $(1 - e^{-\beta z})$ и $1/D$.

В случае $P_{\text{вх}}/P_0 \ll 1$, $\alpha z \ll 1$, $\beta z \ll 1$ (вход сигнала в трубопровод и его выход из трубопровода находятся недалеко друг от друга), разница δ будет определяться величинами 1 и $1/D$. Расчётная характеристика, определённая из уравнения (13), приведена на рис. 3.

Закключение. Из анализа выражений для отношений сигнал–шум следует, что в случае съёма сигнала с ортогональной поляризацией точность измерений, которая определяется отношением сигнал–шум на входе аппаратуры обработки, не превосходит точности измерений достигаемой при прямом съёме сигнала с трубопровода. Кроме того, точность измерений в случае прямого съёма сигнала с трубопровода уменьшается с ростом расстояния между точками ввода и вывода сигнала из трубопровода. Точность измерений в случае съёма сигнала с ортогональной поляризацией достигает максимума при оптимальном выборе расстояния между точками ввода и вывода сигнала.

Сравнение выражений отношения сигнал–шум для преобразователей с непосредственным и направленным съёмом сигналов показывает, что применение направленного съёма позволяет получить большее отношение сигнал–шум.

Список литературы

1. Федюнин П. А., Дмитриев Д. А., Воробьев А. А., Чернышов В. Н. Микроволновая термовлагодетрия. М.: Машиностроение-1, 2004. 208 с.
2. Володько А. В., Краснов Р. П., Юдин В. И. Электромагнитные поля и волны. Ч. 2. Электромагнитные волны и колебания в волноводах и резонаторах. Учебное пособие. Воронеж: МИКТ, 2008. 173 с.

3. Ботов М. И. Основы теории радиолокационных систем и комплексов. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 530 с.

4. Гужов В. И., Несин Р. Б., Емельянов В. А. Представление преобразования Френеля в дискретной форме // Автоматика и программная инженерия. 2016. № 1 (15). С. 91–96.

5. Соколов С. А. Волоконно-оптические линии связи и их защита от внешних влияний. Учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2019. 172 с.

6. Belokopytov G. V., Zhuravlev A. V. *The effect of thin surface layer on Mie scattering resonances*, Proceedings of SPIE, 2006, vol. 6258, pp. 1–12.

7. Parshin A. Yu., Parshin Yu. N., *Usage of non-Gaussian statistics for RF signals detection by complex energy and fractal detector*, Proceedings of International radar symposium – IRS 2013, Germany, Dresden, German Institute of Navigation, 2013, vol. II, pp. 779–784.

8. Понемаренко В. И., Лагунов И. М. Радиопоглощающая структура на основе резистивных квадратов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2018. Т. 23. № 6. С. 30–35. DOI 10.18127/j15604128-201806-05.

9. Сивоконь В. П. Поляризация коротких волн в ионосферном канале связи // Электросвязь. 2007. № 7. С. 55–58.

10. Ледней М. Ф., Тарнавский А. С. Обмен энергией между электромагнитными волнами на дифракционной решётке директора в плоском волноводе с нематическим слоем // Кристаллография. 2013. Т. 58. № 5. С. 713–720.

11. Мищенко С. В., Малков Н. А. Проектирование радиоволновых СВЧ приборов неразрушающего контроля. Тамбов: Издательство Тамбовского государственного технического университета, 2003. 128 с.

12. Татаринов В. Н., Татаринов С. В., Лиетхарт Л. П. Введение в современную теорию поляризации радиолокационных сигналов. Т. 1. Поляризация плоских электромагнитных волн и её преобразования. 2-е изд. Томск: ТУСУР, 2012. 381 с.

13. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. СПб.: Наука, 2007. 133 с.

14. Черногузов Н. С., Пашковец А. В. Исследование техногенных электромагнитных полей // Молодой учёный. 2014. № 20. С. 20–25.

15. Sun L., Yin Y.-Z., Lei X., Wong V., A novel miniaturized branch-line coupler with equivalent transmission lines, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2013, vol. 38, pp. 35–44.

16. Владимиров В. И., Владимиров И. В., Наметкин В. В. Избранные вопросы радиоэлектронного подавления цифровых сигналов систем радиосвязи. Воронеж: ВАИУ, 2010. 119 с.

17. Mongia R. K., Bahl I. J., Bhartia P., Hong J., Gupta K. C. (ed.), *RF and microwave coupled-line circuits*, 2nd ed., Boston, MA, Artech House, 2007, 549 p.

References

1. Fedyunin P. A., Dmitriev D. A., Vorob'ev A. A., Chernyshov V. N., *Mikrovolnovaya termovlagometria*, Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2004, 208 p. (in Russian).

2. Volod'ko A. V., Krasnov R. P., Yudin V. I., *Elektromagnitnye polya i volny. Ch. 2. Electromagnitnye volny i kolebaniya v volnovodakh i rezonatorakh. Uchebnoe posobie*, Voronezh, IICT Publ., 2008, 173 p. (in Russian).
3. Botov M. I., *Osnovy teorii radiolokatsionnykh system i kompleksov*, Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2013, 530 p. (in Russian).
4. Guzhov V. I., Nesin R. B., Emel'yanov V. A., *Automatics & Software Enginery*, 2016, no. 1 (15), pp. 91–96 (in Russian).
5. Sokolov S. A., *Volokonno-opticheskie linii svyazi i ikh zashchita ot vneshnikh vliyaniy. Uchebnoe posobie*, Moscow, Infra-Inzheneriya Publ., 2019, 172 p. (in Russian).
6. Belokopytov G. V., Zhuravlev A. V., *The effect of thin surface layer on Mie scattering resonances*, Proceedings of SPIE, 2006, vol. 6258, pp. 1–12.
7. Parshin A. Yu., Parshin Yu. N., *Usage of non-Gaussian-statistics for RF signals detection by complex energy and fractal detector*, Proceedings of International radar symposium – IRS 2013, Germany, Drezden, German Institute of Navigation, 2013, vol. II, pp. 779–784.
8. Ponemarenko V. I., Lagunov I. M., *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2018, vol. 23, no. 6, pp. 30–35 (in Russian). DOI 10.18127/j15604128-201806-05
9. Sivokon' V. P., *Electrosvyaz*, 2007, no. 7, pp. 55–58.
10. Lednei M. F., Tarnavskii A. S., *Kristallografiya*, 2013, vol. 58, no. 5, pp. 713–720 (in Russian).
11. Mishchenko S. V., Malkov N. A., *Proektirovanie radiovolnovykh SVCH priborov nerazrushayushchego kontrolya*, Tambov, Tambov State Technical University Publ., 2003, 128 p. (in Russian).
12. Tatarinov V. N., Tatarinov S. V., Ligkhart L. P., *Vvedenie v sovremennuyu teoriyu polarizatsii radiolokatsionnykh signalov. Vol. 1. Polarizatsiya ploskikh elektromagnitnykh voln i ee preobrazovaniya*, Tomsk, TUSUR Publ., 2012, 381 p. (in Russian).
13. Deev V. V., *Metody modulyatsii i kodirovaniya v sovremennykh sistemakh svyazi*, Saint Petersburg, Nauka Publ., 2007, 133 p. (in Russian).
14. Chernogubov N. S., Pashkovets A. V., *Molodoi uchenyi*, 2014, no. 20, pp. 20–25 (in Russian).
15. Sun L., Yin Y.-Z., Lei X., Wong V., A novel miniaturized branch-line coupler with equivalent transmission lines, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2013, vol. 38, pp. 35–44.
16. Vladimirov V. I., Vladimirov I. V., Nametkin V. V., *Izbrannye voprosy radioelektronnogo podavleniya tsifrovikh signalov sistem radiosvyazi*, Voronezh, VAIU Publ., 2010, 119 p. (in Russian).
17. Mongia R. K., Bahl I. J., Bhartia P., Hong J., Gupta K. C. (ed.), *RF and microwave coupled-line circuits*, 2nd ed., Boston, MA, Artech House, 2007, 549 p.

Дата поступления: 16.12.2019.

Дата принятия: 03.02.2020.

Structured methods for improving flow measurement accuracy in pipelines

Gurami N. Akhobadze

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation,
e-mail: ahogur@yandex.ru

In the age of digital transformation of production processes in industry and science the development and design of intelligent flow sensors for granular and liquid substances transferring through pipelines becomes more important. With this in view new approaches for improving the accuracy of microwave flowmeters are proposed. Taking into account the characteristics of electromagnetic waves propagating through a pipeline, a wave scattered by inhomogeneities of the controlled medium is analyzed. Features of the transformation of the polarized scattered wave limiting the geometric dimensions of the pipeline and optimizing the values of the useful scattered signal are revealed. Expediency of collection of the information signal with orthogonal polarization of the scattered wave and through a directional coupler is substantiated. The method of estimating the measurement accuracy with reference to the signal-to-noise ratio at the input of the processing device is given. The research results can be used in cryogenic machine engineering to measure volume and mass flows of liquid cryogenic products.

Key words: inhomogeneity, diffraction, scattering volume, noise modulation, electromagnetic wave, signal collection, polarization, scattered wave.

Метод контроля времени продольной релаксации текущей жидкости во всём диапазоне измерения расхода

В. В. Давыдов^{1,2}, Н. С. Мязин¹, С. С. Макеев¹, В. И. Дудкин³

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: myazin.n@list.ru, makeev.pro@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, р. п. Большие Вязёмы, Московская область, Российская Федерация, e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vidoodkin@mail.ru

Рассмотрены проблемы контроля состояния текущей жидкости при её использовании в различных отраслях промышленности, энергетики и сельском хозяйстве. Представлены средства контроля состояния текущей жидкости, принцип работы которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса. Такие средства контроля свободны от недостатков и ограничений по применению, присущих оптическим анализаторам и проточным рефрактометрам. Контролируемыми параметрами при использовании средств контроля на основе явления ядерного магнитного резонанса являются времена релаксации текущей жидкости, в частности, наибольшие сложности возникают при измерении времени продольной релаксации. Предложен метод контроля времени продольной релаксации текущей жидкости во всём диапазоне измерения её расхода. Для реализации нового метода разработана конструкция ядерно-магнитного расходомера-релаксометра. Полученные данные сопоставлены с результатами измерений времён продольной релаксации жидких сред в стационарном состоянии на промышленном ядерно-магнитном релаксометре и установлено их совпадение в пределах погрешности измерений.

Ключевые слова: ядерный магнитный резонанс, магнитное поле, время продольной релаксации, текущая жидкость, отношение сигнал–шум.

Введение. В настоящее время с развитием научно-технического прогресса постоянно расширяется число используемых жидких сред и их смесей в различных отраслях промышленности, энергетики, сельском хозяйстве и сфере услуг [1–6]. Кроме того, увеличивается количество физических, химических и биологических экспериментов, при проведении которых необходимо контролировать состояние текущей среды [5–9]. Наибольшие сложности возникают при контроле состояния текущих сред при турбулентном режиме их течения [4, 10–13]. Различные приборы для контроля состояния текущей среды обладают рядом недостатков и ограничений по применению. Например, разработанные модели оптических анализаторов эффективны для контроля состояния текущих сред с мутностью не более 10 FNU. При этом в среде не должны содержаться нерастворенные частицы, размеры которых больше длины волны используемого лазерного излучения. При невыполнении этих условий погрешность определения состояния среды увеличивается до 10 % (а в ряде случаев и более 10 %). Проточные рефрактометры различных типов [14–19] также имеют ряд ограничений при использовании их для контроля состояния текущих сред. Например, дифференциальные проточные рефрактометры [15, 16, 18] ограничены мутностью среды и наличием нерастворённых субстанций. Рефрактометры, работа которых основана на явлении полного внутреннего

отражения, чувствительны к резким перепадам температуры текущей и окружающей сред. Данные перепады могут возникать при проведении экспериментов, при сбое технологического процесса на промышленном производстве и т. д.

Исследование жидкостей методом ядерного магнитного резонанса. В измерителях, принцип работы которых основан на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР), данные факторы не вносят существенного вклада в погрешность измерений. Эти приборы позволяют бесконтактным методом исследовать различные среды в стационарном и текущем состояниях [19–23]. Поскольку исследования с использованием явления ЯМР в отличие от большинства других применяемых методов бесконтактные, то они не вносят необратимых изменений в физическую структуру и химический состав исследуемой среды [19–25]. Основным условием применения метода ЯМР для изучения сред является наличие в них ядер, обладающих отличным от нуля магнитным моментом, к таким средам относятся любые жидкости [19–26].

Для однозначного определения состояния среды необходимо одновременно измерять две константы релаксации: времена продольной T_1 и поперечной T_2 релаксаций жидкости. Часто встречаются смеси воды со спиртосодержащими или кисломолочными жидкими средами, в которых присутствуют опасные вещества. Для таких веществ в не-

котором диапазоне температур T регистрируемые значения времени поперечной релаксации T_2 будут такими же, как и для исходной среды [23, 24, 28, 29]. Поэтому, чтобы исключить ошибку при определении состояния среды необходимо измерять время не только поперечной T_2 , но и продольной T_1 релаксации. Определение состава жидкости только по измеренным значениям T_1 без учёта значений T_2 также может привести к ошибке. Например, в некоторых соединениях химически неэквивалентных протонов одной и той же молекулы времена релаксации T_1 различны (у толуола для протонов группы CH_3 $T_1=9$ с, а для кольцевых протонов $T_1=16$ с) [24]. Единственными устройствами, которые позволяют одновременно определять указанные константы с погрешностью менее 1 % как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения жидкости, являются расходомеры-релаксометры на основе ЯМР [23, 24, 26–28].

Кроме того, по измеренным значениям времён T_1 , T_2 можно контролировать температуру T и показатель pH потока жидкой среды [23, 24, 28, 29]. Это часто необходимо во время контроля технологических процессов на производстве, особенно при работе с опасными средами или биологическими растворами, когда нежелателен непосредственный контакт измерительных элементов прибора со средой.

Повышение требований к измерительным приборам для определения расхода q жидкости [1–4, 12, 20] однозначно сказалось на требованиях к приборам контроля состояния текущей среды. Данные приборы должны эффективно работать при изменении q минимум на два порядка. Однако в таком диапазоне изменения расхода при измерении времени T_1 методом ЯМР стали возникать проблемы. Основная проблема связана с ограничениями использования ранее разработанных методик измерения значений T_1 в жидкой среде [10, 20, 26, 28]. Например, при проведении экспериментов или контроле технологического процесса достаточно сложно обеспечить проведение измерений T_1 при оптимальном значении расхода $q_{\text{опт}}$ [26, 27] с учётом диапазона изменений значений q , составляющего не менее двух порядков. Кроме того, результаты экспериментов, выполненных авторами настоящей статьи, позволили установить, что для обеспечения максимального отношения сигнал–шум S/N и разрешения регистрируемого сигнала ЯМР в форме «виглей» с использованием модуляционной методики, должны выполняться следующие соотношения:

$$t_r = 2f_m^{-1}; \quad (1)$$

$$\gamma B_m > 10\Delta f_{\text{nmr}}; \quad (2)$$

$$f_m^{-1} > 6T_2, \quad (3)$$

где t_r – время нахождения сегмента жидкости в катушке регистрации; B_m – амплитуда поля модуляции; Δf_{nmr} – естественная ширина линии; f_m – частота модуляции постоянного магнитного поля.

Выполнение соотношений (1)–(3), особенно при больших расходах жидкости, вызывает большие трудности с изменением на порядок частоты f_m , что необходимо для реализации измерения времени T_1 методом экспресс-контроля состояния среды. Этот метод основан на регистрации изменений намагниченности M жидкой среды [26, 27]. Таким образом, актуальным является создание метода измерения времени T_1 продольной релаксации текущей жидкости с погрешностью менее 1 % в диапазоне изменения её расхода минимум на два порядка.

Разработанный метод измерения времени продольной релаксации T_1 текущей жидкости. В конструкциях спектрометров и расходомеров-релаксометров на основе ЯМР сигнал ЯМР регистрируется автодинным детектором с использованием модуляционной методики [4, 9–11, 14]. С учётом особенностей работы автодинного детектора [10, 11, 14] форму линии $G(t)$ регистрируемого сигнала ЯМР описывают соотношением

$$G(t) = F \left(\frac{A}{A+B} v^2(t) + \frac{B}{A+B} u^2(t) \right), \quad (4)$$

где F – коэффициент, учитывающий изменения фазы; A , B – коэффициенты, определяющие вклад в регистрируемый сигнал ЯМР от сигналов поглощения и дисперсии соответственно; $v(t)$, $u(t)$ – сигналы соответственно поглощения и дисперсии.

Сигналы поглощения и дисперсии из уравнения (4) входят в результате решений уравнений Блоха, записанных для вращающейся системы координат [24, 25, 27]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{T_2} + \Delta\omega v(t) &= 0; \\ \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{T_2} - \Delta\omega u(t) + \gamma H_1 M_z(t) &= 0; \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \frac{M}{T_1} - \gamma H_1 v(t) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $\Delta\omega = \omega_a - \omega_{\text{nmr}}$ – расстройка частоты регистрации сигнала ЯМР ω_{nmr} от частоты ω_a прецессии намагниченности M ядер в поле регистрации сигнала ЯМР H_a ($\omega_a = \gamma H_a$; $M = \chi_0 H_a$, χ_0 – статическая ядерная магнитная восприимчивость); M_z – продольная компонента намагниченности.

Для случая регистрации сигнала ЯМР с использованием модуляционной методики [27, 28] на резонансной частоте $\Delta\omega = 0$ система уравнений (5) приобретает следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du(t)}{dt} + \frac{u(t)}{T_2} + \gamma H_m \sin(\omega_m t) v(t) &= 0; \\ \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{T_2} - \gamma H_m \sin(\omega_m t) u(t) + \gamma H_1 M_z(t) &= 0; \\ \frac{dM_z(t)}{dt} + \frac{M_z(t)}{T_1} - \frac{\gamma [H_a + H_m \sin(\omega_m t)]}{T_1} M - \gamma H_1 v(t) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

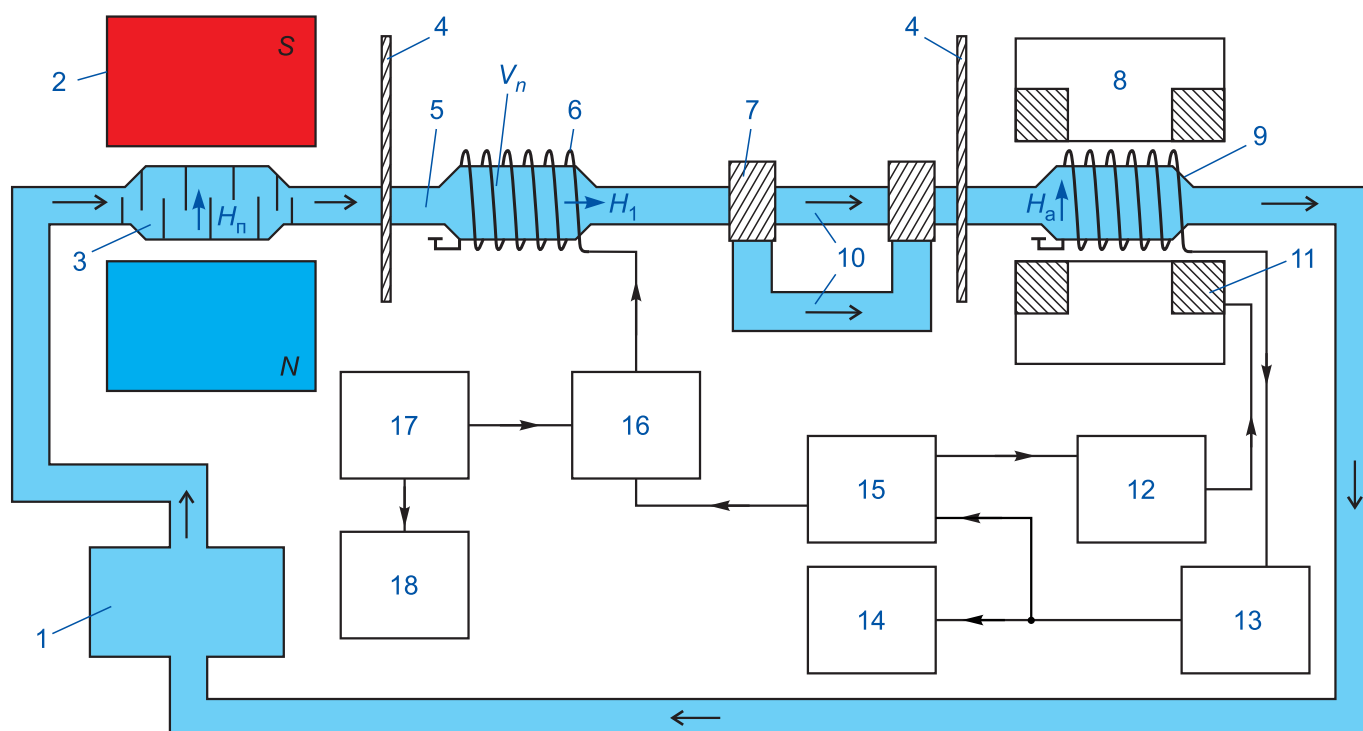


Рис. 1. Структурная схема ядерно-магнитного расходомера-релаксометра:

1 – насос; 2 – магнит-поляризатор; 3 – сосуд-поляризатор; 4 – магнитные экраны; 5 – соединительный участок трубопровода; 6 – катушка нутации; V_n – объём катушки нутации; 7 – переключатели потока; 8 – магнит-анализатор; 9 – катушка регистрации сигнала ЯМР; 10 – соединительный участок трубопровода, подключённый через переключатели потока; 11 – катушки модуляции; 12 – генератор модуляции; 13 – схема регистрации; 14 – осциллограф; 15 – схема обработки и управления; 16 – электронные ключи; 17 – генератор нутации; 18 – частотомер

Fig. 1. The block diagram of a nuclear magnetic flowmeter-relaxometer:

1 – pump; 2 – magnet-polarizer; 3 – vessel-polarizer; 4 – magnetic screens; 5 – connecting section of the pipeline; 6 – nutation coil; V_n – volume of nutation coil; 7 – flow switches; 8 – magnet-analyzer; 9 – coil recording of NMR signal; 10 – connecting section of pipeline connected through flow switches; 11 – modulation coils; 12 – modulation generator; 13 – registration scheme; 14 – oscilloscope; 15 – scheme a processing and control; 16 – electronic keys; 17 – nutation generator; 18 – frequency counter

Система уравнений (6) решается относительно параметров $v(t)$, $u(t)$, $M_z(t)$ с учётом начальных условий

$$M_z(0) = M_m; v(0) = 0; u(0) = 0,$$

где M_m – намагниченность жидкости на входе катушки регистрации спектрометра или расходомера-релаксометра на основе ЯМР.

Согласно результатам экспериментов, выполненных авторами настоящей статьи, амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР зависит от изменения значения M_m . В случае выполнения адиабатической теоремы [24, 27] намагниченность текущей жидкости на всём участке протекания между устройствами для намагничивания и регистрации сигнала ЯМР изменяется только под действием релаксационных процессов. Поэтому для реализации метода определения времени продольной релаксации исследуемой жидкости по её намагниченности требовалось внести такие изменения в конструкцию расходомера-релаксометра на основе ЯМР,

чтобы на участке протекания жидкости от магнита-поляризатора до катушки регистрации выполнялось описанное выше условие адиабатической теоремы.

Экспериментальный ЯМР расходомер-релаксометр.

На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки расходомера-релаксометра дифференциального типа на основе ЯМР для реализации предложенного метода измерения времени T_1 . Текущая жидкость от насоса 1 с начальной намагниченностью M_0 поступает в сосуд-поляризатор 3 объёмом V_p , размещённый в магнитном поле H_p . На выходе из магнита-поляризатора 2 жидкость приобретает намагниченность M_1 :

$$M_1 = \chi_0 H_p \left[1 - \exp\left(-\frac{V_p}{q T_1}\right) \right] + M_0 \exp\left(-\frac{V_p}{q T_1}\right). \quad (7)$$

Для намагничивания жидкости в поляризаторе используют поля с индукцией $B_p > 1$ Тл. Начальная намагниченность текущей среды M_0 формируется в поле Земли ($B_E \approx 0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл).

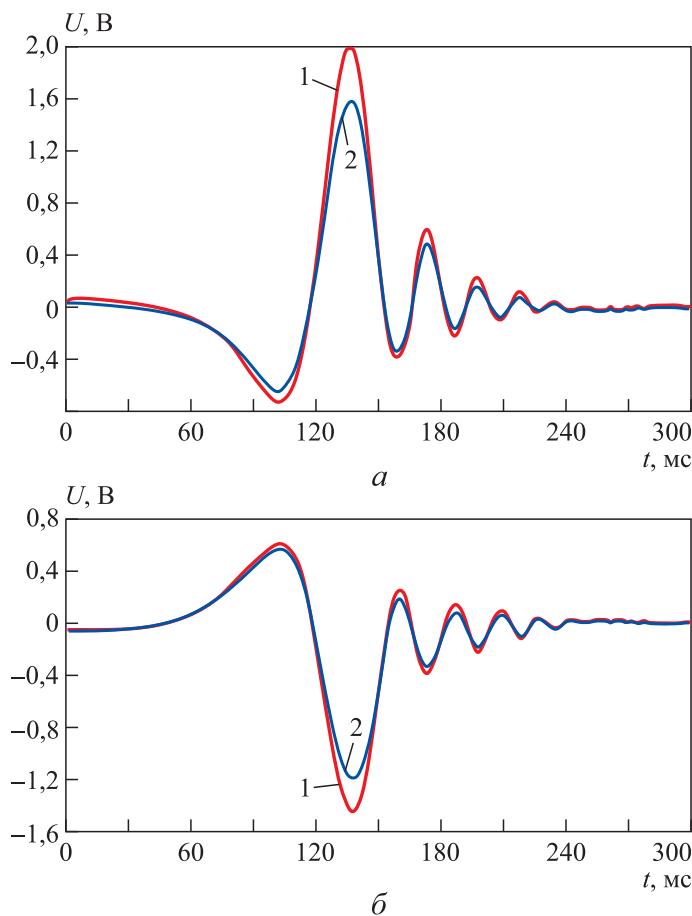


Рис. 2. Формы линий сигналов ЯМР на выходе схемы регистрации ядерно-магнитного расходомера-релаксометра от водного раствора соляной кислоты (1) и водопроводной воды (2) при частоте модуляции $f_m = 50$ Гц:

a – сигналы без инверсии намагниченности, исследуемый объём соединительного участка трубопровода $V_{c1} = 136$ мл; b – сигналы с инверсией намагниченности, исследуемый объём соединительного участка трубопровода $V_{c2} = 202$ мл

Fig. 2. The NMR signal line shapes (without magnetization inversion (a) and inversion (b)) at the output of the detection circuit of nuclear magnetic flowmeter-relaxometer from an aqueous solution of hydrochloric acid (1) and tap water (2) at $f_m = 50$ Hz for various volumes of the connecting section of the pipeline:

$a - V_{c1} = 136$ ml; $b - V_{c2} = 202$ ml

Поэтому вторым слагаемым в формуле (7) можно пренебречь вследствие его малости по сравнению с первым слагаемым. В этом случае выражение (7) примет вид

$$M_1 = \chi_0 H_p \left[1 - \exp\left(-\frac{V_p}{qT_1}\right) \right]. \quad (8)$$

Если установить магнитные экраны 4 так, как показано на рис. 1, то изменения магнитного поля H_t в пределах двух соединительных участков 5, 10 трубопровода и объёма V_n катушки нутации 6 незначительны по сравнению с неоднородностью

Время продольной релаксации T_1 , с, питательной воды для различных установок в зависимости от температуры T

T , °C	Экспериментальная установка	ЯМР Minispec mq 20M
3,1±0,1	2,641±0,023	2,6391±0,008
6,6±0,1	2,713±0,024	2,7127±0,008
10,1±0,1	2,756±0,025	2,7556±0,008
14,2±0,1	2,801±0,025	2,8005±0,008
20,1±0,1	2,852±0,0026	2,8514±0,009
26,1±0,1	2,891±0,026	2,8904±0,009
30,6±0,1	2,974±0,027	2,9734±0,009
40,1±0,1	3,147±0,028	3,1463±0,009
44,6±0,1	3,323±0,030	3,3222±0,010
49,8±0,1	3,502±0,031	3,5012±0,011
55,4±0,1	3,784±0,034	3,7831±0,011
60,6±0,1	4,072±0,037	4,0711±0,012
70,4±0,1	4,968±0,045	4,9670±0,015
78,2±0,1	6,108±0,055	6,1070±0,018
84,1±0,1	7,213±0,065	7,2119±0,021

магнитного поля магнита-поляризатора 2 и магнита-анализатора 8. Поэтому при рассмотрении процесса намагничивания жидкости за время её протекания на участках 5, 10 соединительного трубопровода и в катушке нутации 6 можно использовать среднее значение намагниченности в объёме V_n катушки нутации. В этом случае значение M_m на выходе соединительного участка трубопровода 10 можно определить по выражению

$$M_m = \chi_0 H_t \left[1 - \exp\left(-\frac{V_m + V_n + V_c}{qT_1}\right) \right] + M_1 \exp\left(-\frac{V_m + V_n + V_c}{qT_1}\right), \quad (9)$$

где V_m , V_c – объёмы соединительных участков 5, 10 трубопровода соответственно.

Экспериментально установили, что в разработанной установке индукция $B_t < 0,0002$ Тл при $B_a \approx 0,3$ Тл и $B_p > 1$ Тл. Кроме того, текущая жидкость в объёме $V_m + V_n + V_c$ находится в течение времени, которое в несколько раз меньше времени продольной релаксации T_1 . За это время в магнитном поле жидкость приобретает только 30 % максимальной намагниченности $\chi_0 H_t$ [1, 4, 10, 14]. Поэтому первым слагаемым в соотношении (9) можно пренебречь вследствие его малости по сравнению со вторым слагаемым, содержащим M_1 . Тогда выражение (9) примет вид

$$M_m = \chi_0 H_p \left[1 - \exp\left(-\frac{V_p}{qT_1}\right) \right] \exp\left(-\frac{V_m + V_n + V_c}{qT_1}\right). \quad (10)$$

В соответствии с разработанным методом для измерения T_1 использовались два участка 10 соединительного трубопровода разных объёмов V_{c1} , V_{c2} , в которые жидкость поступала через переключатели потока, установленные на этих участках (см. рис. 1). Данные участки включали поочерёдно (по одному протекает жидкость, в другом течение жидкости заблокировано переключателем). Два регистрируемых сигнала ЯМР от текущей жидкости при таком поочерёдном включении соединительных участков 10 трубопровода будут отличаться между собой по амплитуде пропорционально изменению намагниченности M_m согласно соотношениям (6), (10). На рис. 2, а представлены регистрируемые сигналы ЯМР от водного раствора соляной кислоты при $T=19,4$ °С для двух указанных выше объёмов V_{c1} , V_{c2} . Анализ формы линии полученных сигналов ЯМР показывает, что в случае увеличения V_c амплитуда регистрируемого сигнала ЯМР уменьшается, что соответствует условиям (6) с учётом выражения (10). Для подтверждения полученных данных исследовали формы линий сигналов ЯМР с инверсией намагниченности [20, 23, 24], которая создается в катушке нутации. На рис. 2, б представлены регистрируемые сигналы ЯМР от водопроводной воды при $T=19,2$ °С для двух значений объёмов V_c . В результате исследований установили, что совпадают характеры изменений амплитуды регистрируемого сигнала ЯМР вследствие изменения значения V_c для сигналов с инверсией намагниченности и без инверсии. Это означает, что на всём участке протекания намагниченной жидкости от сосуда-поляризатора 3 до катушки регистрации 9 (см. рис. 1) выполняется условие адиабатической теоремы [24, 27]. В этом случае будет справедливо следующее соотношение:

$$U_1/U_2 = M_{m1}/M_{m2}, \quad (11)$$

где U_1 , U_2 – значения амплитуд сигналов ЯМР при различных значениях объёмов V_{c1} , V_{c2} соединительного участка трубопровода; M_{m1} , M_{m2} – значения намагниченности текущей

жидкости на выходе участков трубопроводов объёмами V_{c1} , V_{c2} .

Так как условия протекания жидкой среды по участку 10 трубопровода 5 и в объёме катушки нутации для двух значений объёмов V_{c1} , V_{c2} идентичны (см. рис. 1), то соотношение (11) с учётом выражения (10) можно преобразовать к виду

$$U_1/U_2 = \exp\left(-\frac{V_{c1}}{qT_1}\right) / \exp\left(-\frac{V_{c2}}{qT_2}\right). \quad (12)$$

Из выражения (12) после преобразований следует соотношение для определения времени T_1 продольной релаксации по измеренным значениям амплитуд U_1 , U_2 и расхода q :

$$T_1 = (V_{c1} - V_{c2}) / [q \ln(U_1/U_2)]. \quad (13)$$

На рис. 3 показана зависимость изменения времени T_1 от температуры T , полученная с использованием формулы (13) для текущего потока питательной воды (применяется во втором контуре атомного реактора). Цикл измерения времени T_1 повторяли 10 раз для усреднения данных и оценки погрешности измерения в соответствии со стандартными методиками.

Анализ полученных результатов показал, что характер изменения зависимости $T_1(T)$ для питательной воды такой же, как и для воды других типов – дистиллированной, тяжёлой, водопроводной с различным содержанием кислорода, минеральной и т. д.

Пробу питательной воды также исследовали при различных температурных режимах на стационарном ЯМР релаксometре Minispec mq 20M (BRUKER, Germany) с использованием калориметрического блока. В таблице для сравнения представлены результаты измерения значений T_1 разработанным методом с использованием экспериментальной установки и на промышленном приборе. Полученные значения T_1 совпали в пределах погрешности измерений.

Заключение. Авторами настоящей статьи экспериментально установлено, что разработанный метод контроля времени продольной релаксации позволяет проводить измерения с погрешностью менее 1 % в реальном времени одновременно с измерениями времени поперечной релаксации при расходах жидкости от $0,1q_{\text{опт}}$ до $20q_{\text{опт}}$ оптимального значения расхода [26, 27]. Использование данного метода измерения существенно расширяет возможности использования ЯМР расходомеров-релаксometров, как для проведения научных исследований, так и для решения различных задач в энергетике и промышленности.

Список литературы

1. Лесников Е. В., Балаханов Д. М., Добровольский В. И. Метрологическое обеспечение жидкостных и аэрозольных счётчиков // Измерительная техника. 2017. № 1. С. 60–63. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-1-60-63
2. Исаев М. М., Алиев М. А., Абдуллаев В. Г., Назаров Р. Б., Мамедова М. Б. Разработка универсальной автоматической системы и алгоритма для калибровки нефтяных резервуаров // Измерительная техника. 2016. № 6. С. 48–51.

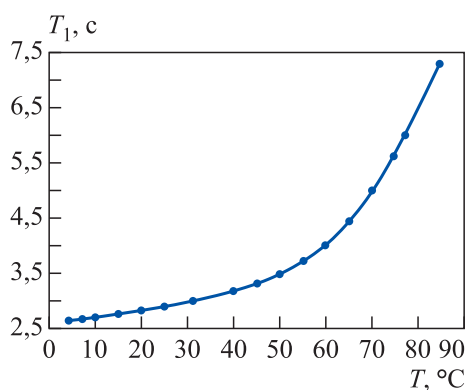


Рис. 3. Зависимость времени продольной релаксации T_1 питательной воды от температуры T

Fig. 3. The dependence of the longitudinal relaxation time T_1 of feed water on temperature T

3. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю. Малогабаритный ядерно-магнитный релаксометр для экспресс-контроля состояния жидких и вязких сред. // Измерительная техника. 2014. № 8. С. 44–48.
4. Даев Ж. А. Метод измерения пульсирующего расхода жидкости // Измерительная техника. 2016. № 3. С. 29–31.
5. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Силаев А. А., Марусин Н. П., Закемовская Е. Ю., Гилев А. Г., Алексеев А. В. Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред // Измерительная техника. 2014. № 4. С. 62–65.
6. Davydov R. V., Antonov V. I., Yushkova V. V., Grebenikova N. M., *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1236 (1), p. 012079.
7. Filippov A., Artamonova M., Rudakova M., Gimatdinov R., Skirda V., *Magnetic Resonance in Chemistry*, 2012, vol. 50 (2), pp. 114–119.
8. Дьяченко С. В., Кондрашкова И. С., Жерновой А. И. Исследование сидементации ферромагнитных наночастиц в магнитной жидкости методом ЯМР // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. Вып. 10. С. 1596–1598. DOI: 10.21883/JTF.2017.10.45007.2213
9. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Магнитный расходомер жидких металлов. // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 24–28.
10. Давыдов В. В., Дудкин В. И., Карсеев А. Ю., Вологдин В. А. Особенности применения метода ядерно-магнитной спектроскопии для исследования потоков жидких сред // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. № 6. С. 898–902.
11. Popovac M., Hanjalic K., *Flow, Turbulence and Combustion*, 2007, vol. 78 (2), pp. 177–184.
12. Grebenikova N. M., Smirnov K. J., Artemiev V. V., Kruzhlov S. V., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1038 (1), p. 012089.
13. Зубов В. А., Ринкевичюс Б. С. Оптические методы исследования потоков // Квантовая электроника. 1997. Т. 24. № 12. С. 1161–1163.
14. Карабегов М. А. Метрологические характеристики рефрактометров полного внутреннего отражения // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 50–54.
15. Карабегов М. А. Автоматические рефрактометры разностной призмы для контроля технологических процессов // Измерительная техника. 2007. № 6. С. 31–36.
16. Мищенко Ю. В. Метод рефрактометрического контроля жидкостей в технологических установках // Измерительная техника. 2007. № 12. С. 25–30.
17. Лейбенгард Г. И., Найденов А. С., Шур В. Л. Жидкостный лазерный интерференционный рефрактометр для измерения концентраций растворов // Измерительная техника. 2004. № 12. С. 58–53.
18. Grebenikova N. M., Smirnov K. J., Rud' V. Yu., Artemiev V. V., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1135 (1), p. 012055.
19. Grebenikova N. M., Smirnov K. J., Rud' V. Yu., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1124 (4), p. 041011.
20. Давыдов В. В. Ядерно-магнитный спектрометр для исследования потоков жидких сред. // Измерительная техника. 2016. № 11. С. 46–51.
21. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Марусин М. П., Силаев А. А., Закемовская Е. Ю., Мустафаев Ю. Н. Синтез градиентной системы мультифазного расходомера // Измерительная техника. 2014. № 5. С. 68–72.
22. Неронов Ю. И., Серегин Н. Н. Разработка и исследование импульсного измерителя магнитной индукции на основе ядерно-магнитного резонанса для диапазона сильных магнитных полей. // Измерительная техника. 2017. № 8. С. 46–48. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-8-46-48
23. Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu., *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58(2), pp. 146–152.
24. Жерновой А. И., Латышев Г. Д. Ядерный магнитный резонанс в проточной жидкости. М.: Атомиздат, 1964.
25. Bloch F., Hansen W.W., Packard F., *Physical Review*, 1946, vol. 70(4), pp. 474–488.
26. Chiarotti G., Cristiani G., Giulotto L., *Physical Review*, 1954, vol. 93, pp. 1241–1247.
27. Леше А. Ядерная индукция: Пер. с англ. М.: Иностранная литература, 1963.
28. Давыдов В. В., Мязин Н. С. Многофункциональный малогабаритный ядерно-магнитный спектрометр // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 58–62. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-2-58-62
29. Kashaev R. S., Gazizov E. G., *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 77(3), pp. 321–328.

References

1. Lesnikov E. V., Balakhanov D. M., and Dobrovol'skii V. I., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 87–91. DOI: 10.1007/s11018-017-1154-y
2. Isaev M. M., Aliev M. A., Abdullaev V. G., Nazarov R. B., and Mamedova M. B., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 6, pp. 642–644. DOI: 10.1007/s11018-016-1020-3
3. Davydov V. V., Dudkin V. I., and Karseev A. Yu., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 912–918. DOI: 10.1007/s11018-014-0559-0
4. Daev Z. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 243–246. DOI: 10.1007/s11018-016-0951-z
5. Marusina M. Ya., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Silaev A. A., Marusin M. P., Zakemoskya E. Yu., Gilev A. G., and Alekseev A. V., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 461–465. DOI: 10.1007/s11018-014-0478-0
6. Davydov R. V., Antonov V. I., Yushkova V. V., Grebenikova N. M., *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1236 (1), p. 012079.
7. Filippov A., Artamonova M., Rudakova M., Gimatdinov R., Skirda V., *Magnetic Resonance in Chemistry*, 2012, vol. 50 (2), pp. 114–119.
8. D'yachenko S. V., Kondrashkova I. S., and Zhernovoi A. I., *Technical Physics*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 1602–1604.
9. Velt I. D., and Mikhailova Yu. V., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 283–288. DOI: 10.1007/s11018-013-0196-z
10. Davydov V. V., Dudkin V. I., Karseev A. Yu., and Vologdin V. A., *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 6, pp. 1013–1019.

11. Popovac M., and Hanjalic K., *Flow, Turbulence and Combustion*, 2007, vol. 78, no. 2, pp. 177–184.
12. Grebenikova N. M., Smirnov K. J., Artemiev V. V., Kruzhlov S. V., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1038 (1), p. 012089.
13. Zubov V. A., and Rinkevicius B. S., *Quantum Electronic*, 1997, vol. 24, no. 12, pp. 1161–1163.
14. Karabegov M. A., *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 11, pp. 1106–1112. DOI: 10.1007/s11018-005-0069-1
15. Karabegov M. A., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 6, pp. 619–628. DOI: 10.1007/s11018-007-0120-5
16. Mishchenko Yu. V., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 12, pp. 1274–1281. DOI: 10.1007/s11018-007-0238-5
17. Leibengardt G. L., Naidenov A. S., and Shur V. L., *Measurement Techniques*, 2004, vol. 47, no. 12, pp. 1211–1216. DOI: 10.1007/s11018-005-0090-4
18. Grebenikova N. M., Smirnov K. J., Rud' V. Yu., Artemiev V. V., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1135 (1), p. 012055.
19. Grebenikova N. M., Smirnov K. J., Rud' V. Yu., *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1124 (4), p. 041011.
20. Davydov V. V., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 11, pp. 1202–1209. DOI: 10.1007/s11018-017-1116-4
21. Marusina M. Y., Bazarov B. A., Galaidin P. A., Marusin M. P., Silaev A. A., Zakemovskya E. Y., and Mustaev Y. N., *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, no. 5, pp. 580–586. DOI: 10.1007/s11018-014-0501-5
22. Neronov Y. I., and Seregin N. N., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 8, pp. 818–822. DOI: 10.1007/s11018-017-1276-2
23. Davydov V. V., Dudkin V. I., and Karseev A. Yu., *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 2, pp. 146–152.
24. Zhemovoi A. I., and Latyshev G. D., *Nuclear magnetic resonance in a flowing liquid*, Publ. Consultants Bureau, New York, USA, 1965.
25. Bloch F., Hansen W.W., Packard F., *Physical Review*, 1946, vol. 70(4), pp. 474–488.
26. Chiarotti G., Cristiani G., Giulotto L., *Physical Review*, 1954, vol. 93, pp. 1241–1247.
27. A. Leshe, *Nuclear induction*, Publ. Veb Deutscher Verlag Der Wissenschaften, Berlin, Germany, 1963.
28. Davydov V. V., and Myazin N. S., *Measurement Techniques*, 2017, vol. 60, no. 2, pp. 183–189. DOI: 10.1007/s11018-017-1171-x
29. Kashaev R. S., Gazizov E. G., *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 77(3), pp. 321–328.

Дата поступления: 27.11.2019.

Дата принятия: 30.01.2020.

The new method for longitudinal relaxation time control of flowing liquid in the entire range of its expenditure measuring

Vadim V. Davydov^{1,2}, Nikita S. Myazin¹, Sergey S. Makeev¹, Valentin I. Dudkin³

¹Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: myazin.n@list.ru, makeev.pro@mail.ru

²All-Russian Research Institute of Phytopathology, B. Vyazyomy, Moscow Region, Russian Federation,
e-mail: davydov_vadim66@mail.ru

³The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russian Federation,
e-mail: vidoodkin@mail.ru

The problems of the condition control of flowing liquid during its use in different industries, energy and agriculture are reviewed. The devices of the flowing liquid condition control whose operating principle is based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance are presented. This devices do not have the disadvantages and limitations of use inherent in optical analyzers and flowing refractometers. At using controls based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance the controlled parameters are the relaxation times of the flowing fluid, in particular, the greatest difficulties arise when measuring the longitudinal relaxation time. The method for control of longitudinal relaxation time T_1 of flowing liquid in the entire range of measuring its expenditure is proposed. To implement a new method the design of nuclear magnetic flowmeter-relaxometer is developed. The obtained data are compared with the measurement results of values T_1 for liquid media being in a stationary state are received on industrial nuclear magnetic relaxometer and is determined them coincidence within the measurement error.

Key words: nuclear magnetic resonance, magnetic field, longitudinal relaxation time, flowing liquid, signal to noise ratio.

Оценка соотношения информативного и фоновых сигналов при регистрации магнитных полей поверхностных дефектов магнитоизмерительными преобразователями

Ю. Л. Николаев, Э. Ф. Ахметшина, А. А. Саморуков, А. В. Чернова

Физико-технологический институт «МИРЭА – Российский технологический университет»,
Москва, Российская Федерация, e-mail: nikolaev_yu@mirea.ru, elina.ahmetschina@yandex.ru,
samorukov.alexey@gmail.com, aleks.chernova@gmail.com

Рассмотрены проблемы выявления дефектных участков поверхности контролируемых объектов и оценивания параметров дефекта. Описано использование магнитоизмерительных преобразователей в качестве средств регистрации и измерения параметров локально распределённых магнитных полей, возникающих над дефектными участками поверхности контролируемого объекта в приложенном постоянном магнитном поле. Предложены алгоритмы для количественной оценки соотношения информативной и фоновой составляющих выходного сигнала магнитоизмерительных преобразователей. Приведена методика разделения информативной и фоновой составляющих. Методика основана на свойстве суммирования и детерминированном характере распределений напряжённости магнитного поля дефекта и фонового магнитного поля вдоль оси координат, параллельной контролируемой поверхности, а также на анализе топографии распределения напряжённости магнитного поля. Обоснован подход к выбору и экспериментальному определению оценочных параметров, характеризующих уровни информативного и фонового сигналов. Приведены формулы для вычисления отношения сигнал–фон по измеренным значениям оценочных параметров применительно к одинарным магнитостатическим, дифференциальным магнитостатическим и дифференцирующим магнитоизмерительным преобразователям с учётом направления ориентации (нормального, тангенциального) их оси чувствительности. Представлены результаты расчёта отношения сигнал–фон на примере анализа выходного сигнала магнитоизмерительного преобразователя при регистрации распределения напряжённости магнитного поля над поверхностью контрольного образца с искусственными дефектами заданных размеров. Выполнен сравнительный анализ рассматриваемых видов магнитоизмерительных преобразователей по отношению сигнал–фон и даны общие рекомендации по повышению значения этого отношения.

Ключевые слова: магнитоизмерительные преобразователи, магнитное поле дефекта, соотношение сигнал–фон.

Введение. Магнитоизмерительные преобразователи (МИП) [1–4] широко используются в качестве средств регистрации и измерения параметров неоднородных магнитных полей, локально распределённых над трещиноподобными дефектами в поверхностном слое намагниченного контролируемого объекта. Это позволяет выявить дефектные участки поверхности и при определённых условиях оценить параметры дефекта.

При сканировании поверхности контролируемого объекта ось чувствительности МИП ориентируют на регистрацию тангенциальной или нормальной (параллельной или перпендикулярной поверхности контролируемого объекта) составляющих напряжённости магнитного поля. В результате регистрации распределения напряжённости вдоль оси координат выявляют участки с резким изменением напряжённости, обусловленным наличием дефекта. По измеренным значениям параметров распределения можно оценить параметры дефекта.

В процессе сканирования МИП реагирует как на магнитное поле дефекта, так и на фоновые магнитные поля, возникающие из-за воздействия различных факторов, но главным образом из-за рассеяния магнитных потоков в замкнутой магнитной системе «полюсные магниты – контролируемый объект». Данное обстоятельство существенно влияет на достоверность выявления дефектов и в значительной степени усложняет оценивание параметров дефекта. Особенно затруднительно выявление информативных полей в изгибах, впадинах и стыковых соединениях сложнопрофильных изделий. В связи с этим для повышения порога чувствительности и точности измерения параметров дефекта методами магнитной дефектоскопии и дефектометрии с использованием МИП актуальным является увеличение соотношения сигнал–фон *SBR*.

Для увеличения значения *SBR* применяют компенсационный, дифференциальный, спектральный и другие способы отстройки от фоновых полей [5, 6]. Однако в литературных

источниках, например [5], приведены только качественные оценки эффективности этих способов.

Цель настоящей статьи – количественное оценивание и анализ соотношения сигнал–фон при регистрации поверхностных дефектов объектов, намагниченных постоянным магнитным полем.

Далее рассмотрим МИП для измерения и регистрации напряжённости (индукции) неоднородных магнитных полей, возникающих над дефектами. Наиболее широко распространены следующие МИП:

одинарные магнитостатические (преобразователи Холла, феррозонды, магниторезисторы и др.);

дифференциальные (состоят из двух идентичных магнитостатических МИП, расположенных на некотором расстоянии друг от друга);

дифференцирующие (индукционные преобразователи).

Разделение информативного и фоновых сигналов одинарных магнитостатических МИП. Эти приборы регистрируют сумму напряжённостей фоновых и информативного магнитных полей. На рис. 1 показаны суммарные распределения ортогональных (тангенциальной *I* и нормальной *II*) составляющих напряжённости магнитного поля. Распределения получены прямым измерением напряжённости при перемещении МИП вдоль линии намагничивания контрольного образца

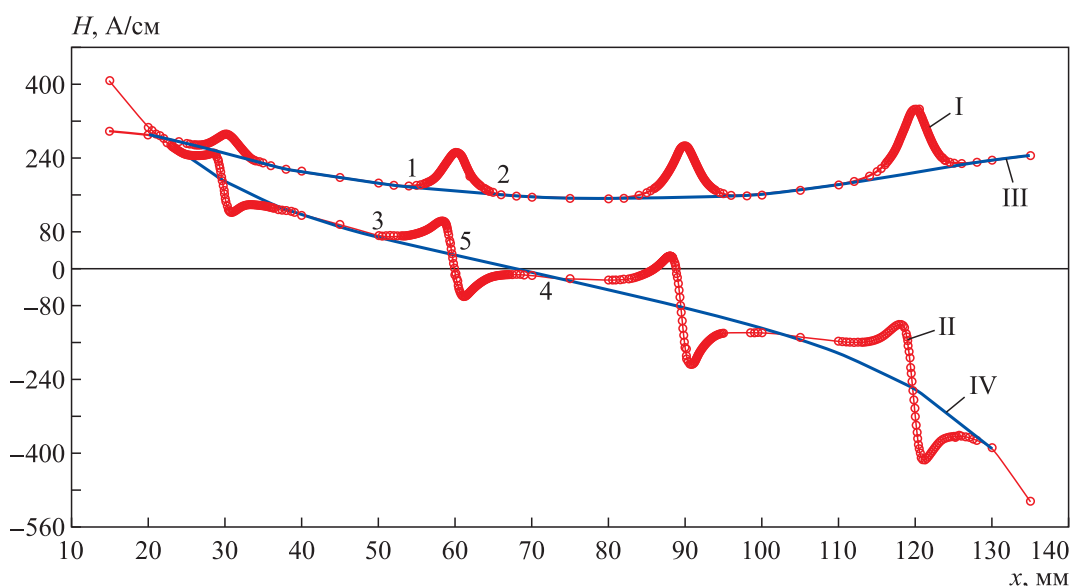


Рис. 1. Распределения тангенциальной *I* и нормальной *II* составляющих магнитного поля над поверхностью контрольного образца:

III, *IV* – фоновые поля; точки 1, 2 и 3, 4 – границы поля рассеяния дефекта при регистрации соответственно тангенциальной и нормальной составляющих поля; 5 – точка пересечения нормального распределения и прямой линии, проходящей через границы поля рассеяния дефекта

Fig. 1. Distributions of the tangential *I* and normal *II* components of the magnetic field above the surface of the tested sample:

III, *IV* – background fields; points 1, 2 and 3, 4 – boundaries of the defect scattering field during registration of the tangential and normal components of the field, respectively; 5 – the intersection point of the normal distribution and a straight line passing through the boundary of the defect scattering field

длиной 150 мм с искусственными поверхностными дефектами прямоугольной формы, расположенными в точках образца 30, 60, 90 и 120 мм, глубиной 1, 2, 3 и 4 мм соответственно. Ширина каждого дефекта составляет 0,1 мм. Намагничивание осуществлено полюсными магнитами дефектоскопа МД-6. Намагничивающая система с контрольным образцом расположена на двухкоординатном измерительном столе. На вертикальной стойке стола жёстко закреплён первичный преобразователь Холла миллитесламетра ТПУ-01. Существует возможность высокоточного относительного перемещения контрольного образца и преобразователя. При этом фактические зазоры между контролируемой поверхностью и плоскостями нормально и тангенциально ориентированного преобразователя Холла составляют 0,7 и 3,5 мм соответственно. В местах расположения дефекта шаг измерений равен 0,1 мм.

Из рис. 1 следует, что МИП измеряет сумму напряжённостей магнитных полей дефекта и фона, причём распределение этих полей носит детерминированный характер. Фоновые поля *III*, *IV* выделены с использованием алгоритма сплайн-интерполяции [7] между точками, соответствующими границам поля рассеяния дефекта. Для практических целей достаточно линейной интерполяции.

На рис. 2, *a* представлено зарегистрированное распределение тангенциальной составляющей напряжённости магнитного поля над дефектом

глубиной 2 мм. Методика разделения информативной и фоновой составляющих выходного сигнала $H(x)$ МИП заключается в следующем. Через точки 1, 2, соответствующие границам поля рассеяния дефекта, проходит прямая линия $H_{\phi}(x)$, формирующая распределение фоновых сигналов. По координатам (x_1, H_1) , (x_2, H_2) точек 1, 2 определяют уравнение прямой линии, после чего из измеренных суммарных значений напряжённости $H(x)$ вычитают значения напряжённости $H_{\phi}(x)$, определяемые по уравнению прямой линии. Это позволяет восстановить топографию поля распределения дефекта, а следовательно, выделить значения информативного сигнала с последующими дефектометрическими оценками.

Аналогичный подход применяют для выделения

информативного сигнала при регистрации по нормальной составляющей (рис. 2, б). Для этого производится построение прямой линии, проходящей через границы поля рассеяния дефекта (точки 3, 4) и пересекающей распределение в точке 5. Распределение информативного сигнала определяется разностью распределений сигналов $H(x)$ и $H_{\phi}(x)$.

Оценивание SBR одинарного магнитостатического МИП. При оценке соотношения информативного и фонового сигналов МИП в качестве параметра, характеризующего уровень информативного сигнала, целесообразно ориентироваться на экстремальные значения сигнала в пределах границ поля рассеяния дефекта, измеряя его размах (pick-to-pick). Уровень фонового сигнала принято характеризовать среднеквадратическим значением (СКЗ). Отношение этих параметров является оценкой SBR. Таким образом, соотношение информативного и фонового сигналов при регистрации магнитного поля тангенциально ориентированным одинарным МИП определяется отношением пикового значения информативного сигнала $H_{\max}$ к значению фонового сигнала H_{ϕ} в точке, соответствующей пиковому значению информативного сигнала. Например, в точке $x=60$ мм (см. рис. 2, а) по тангенциальной составляющей получено отношение $SBR=H_{\max}/H_{\phi}=0,5$.

При регистрации нормально ориентированным МИП в качестве пиковых значений принимаются экстремальные (максимальное $H_{\max}$ и минимальное $H_{\min}$) значения информативного сигнала, отсчитанные от линии, соединяющей граничные точки 3, 4 распределения (см. рис. 2, б). Отношение сигнал-фон вычисляется как отношение разности экстремальных значений информативного сигнала к СКЗ

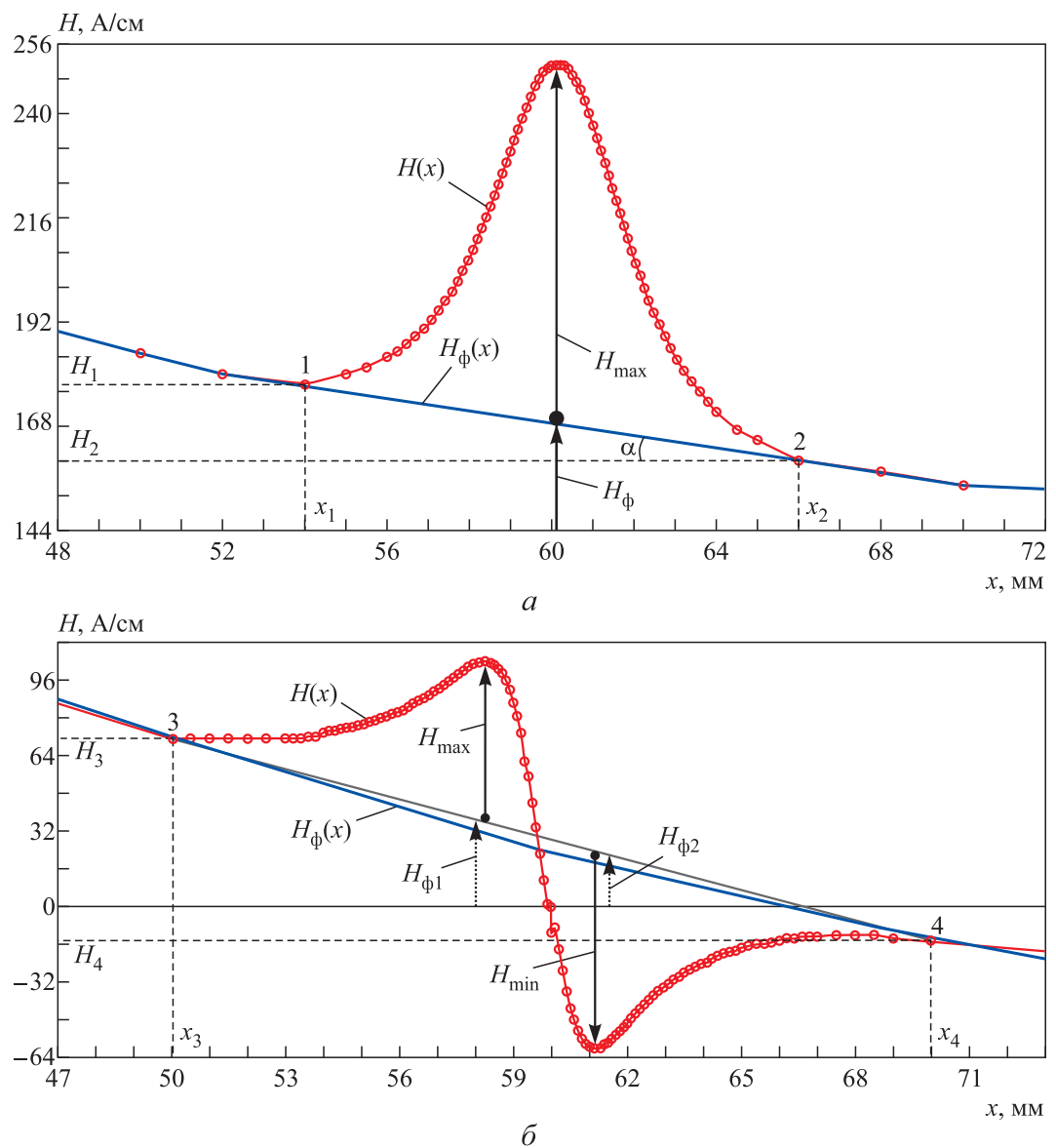


Рис. 2. Выделение информативного сигнала при регистрации тангенциальной (а) и нормальной (б) составляющих напряжённости магнитного поля дефекта:

точки 1–4 – те же, что на рис. 1; α – угол наклона интерполирующей прямой

Fig. 2. Isolation of an informative signal during registration of the tangential (a) and normal (b) components of the magnetic field strength of a defect:

points 1–4 are the same as in figure 1; α – the angle of the interpolating line

фоновых сигналов $H_{\phi 1}$, $H_{\phi 2}$, измеренных в точках отсчёта пиковых сигналов:

$$SBR = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\sqrt{(H_{\phi 1}^2 + H_{\phi 2}^2)/2}}.$$

В данном случае значение SBR может изменяться в широких пределах в зависимости от местоположения дефекта. В частности, при расположении дефекта вблизи магнитных полюсов SBR составляет десятые доли единицы,

а при расположении в области магнитного нуля – до десятка единиц. В рассматриваемом примере $SBR=5,1$.

Погрешность вычисления SBR с использованием интерполирующей прямой зависит от знака и значения отклонения ΔH прямой линии от действительной фоновой характеристики в точках отсчёта пиковых значений. Для тангенциальной составляющей $\Delta H > 0$. С учётом знака приращения оценочных параметров формула для вычисления абсолютной погрешности ΔSBR имеет вид

$$\Delta SBR = H_{\max} / H_{\phi} - (H_{\max} + \Delta H) / (H_{\phi} - \Delta H).$$

Аналогичный подход применяется для вычисления ΔSBR по нормальной составляющей. При этом учитывается, что в области положительных значений $H_{\phi}(x)$ отклонение ΔH также будет положительным, а в области отрицательных значений $H_{\phi}(x)$ – отрицательным. Для представленных на рис. 1 графиков распределений относительная погрешность вычисления SBR не превышает 7 %.

На практике существенно увеличить значение SBR одинарных магнитостатических МИП можно при их размещении по центру между полюсами намагничивающего поля. При этом требуется аппаратная компенсация

фоновой сигнала до нулевого значения по результатам измерения напряжённости фоновой поля в нескольких точках на бездефектных участках контролируемой поверхности. На дефект указывает выходной сигнал МИП, больший установленного порогового значения, которое превышает уровень стохастически распределённого шумового сигнала, и смещение нуля, возникающее из-за возможного перераспределения фоновой поля относительно положения МИП. Особенно значимо перераспределение фоновой поля при контроле криволинейных и сложнопрофильных поверхностей в связи с необходимостью угловых и линейных смещений МИП относительно полюсов, а также из-за изменения зазора между МИП и контролируемой поверхностью. В этом случае применяют градиентометрические способы регистрации – дифференциальный, дифференцирующий.

Выходной сигнал дифференциальных МИП. Выходной сигнал определяется разностью измеренных значений напряжённости в точках размещения одинарных МИП:

$$\Delta H(x) = H(x) - H(x \pm b),$$

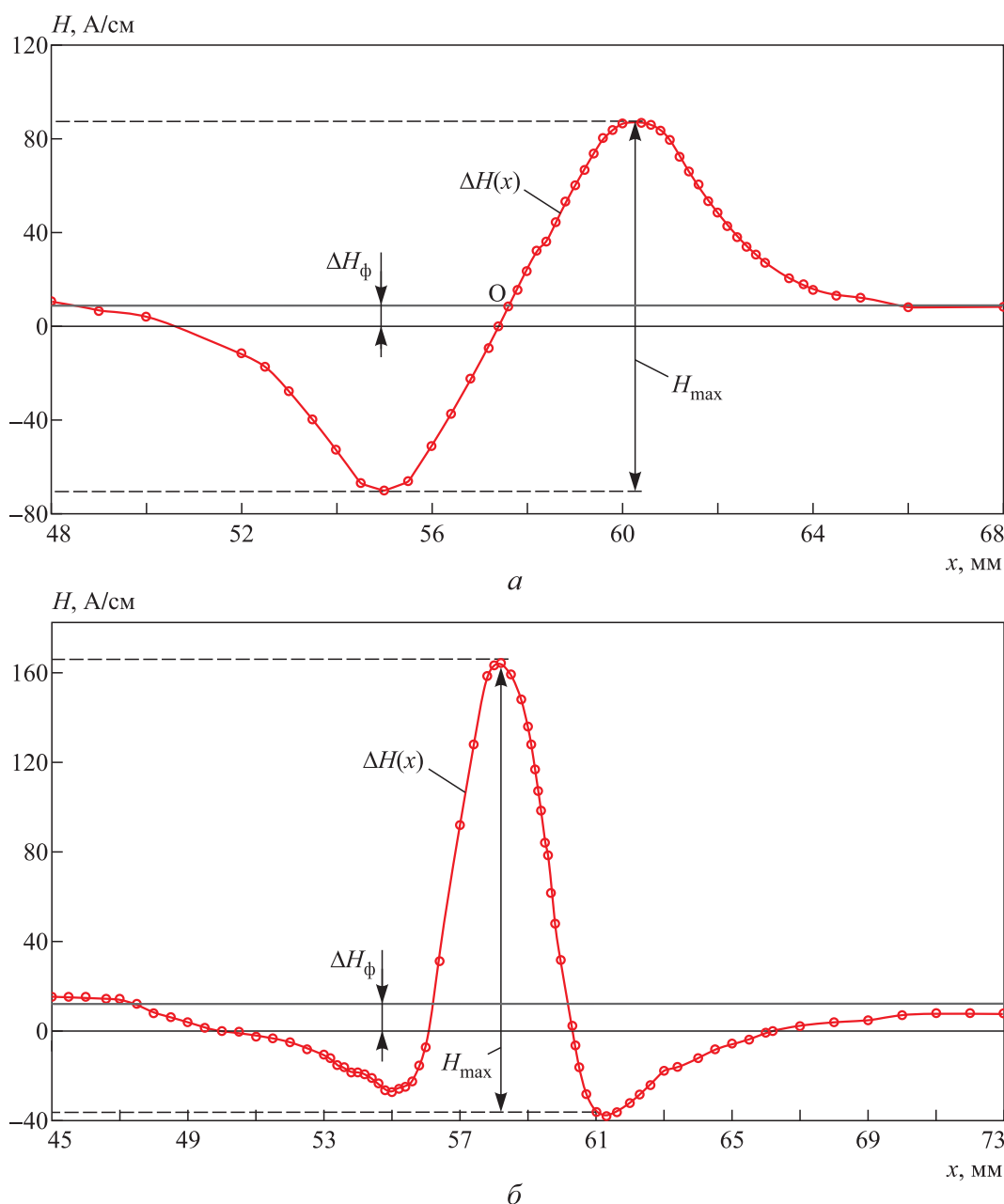


Рис. 3. Оценивание отношения SBR дифференциальных МИП, ориентированных тангенциально (а) и нормально (б)

Fig. 3. Estimation of the SBR ratio of differential MMTs oriented tangentially (a) and normally (b)

где $H(x)$, $H(x \pm b)$ – выходные сигналы соответственно МИП1 и МИП2; x – линейная координата положения МИП1; b – расстояние между МИП.

На рис. 3, а приведено распределение значений выходного сигнала $\Delta H(x)$ дифференциального МИП при сканировании дефекта глубиной 2 мм. Данный МИП состоит из двух тангенциально ориентированных преобразователей Холла, расположенных друг от друга на расстоянии 5 мм. Расстояние между МИП выбрано близким половине расстояния между точками 1, 2 распределения тангенциальной составляющей (см. рис. 2, а). В этом случае регистрируются два экстремума. Влияние фона сводится к смещению разностного сигнала $\Delta H(x)$ вдоль оси ординат на значение приращения фонового сигнала на отрезке длиной b . Распределение фонового сигнала на интервале $[x_1, x_2]$ интерполировано прямой линией (с углом наклона α), поэтому в пределах этого интервала приращение фона $\Delta H_{\phi}(x)$ остаётся постоянным:

$$\Delta H_{\phi} = btg\alpha.$$

В рассматриваемом примере $\Delta H_{\phi} = 8$ А/см.

При определении ΔH_{ϕ} непосредственно по кривой распределения разностного сигнала $\Delta H(x)$ значение ΔH_{ϕ} вычисляют как полусумму значений $\Delta H(x)$ в граничных точках интервала $[(x_1 - b), (x_2 + b)]$. При этом распределение приращения фонового сигнала считают равномерным. В данном случае $\Delta H_{\phi} = 8,1$ А/см.

В зависимости от направления перемещения дифференциального МИП и очередности вычитания значений сигналов одинарных МИП значения смещения будут равны по модулю, но могут быть разными по знаку. Соответственно инвертируется разностный сигнал $\Delta H(x)$. Независимо от этого информативный сигнал выделяют вычитанием из разностного сигнала $\Delta H(x)$ постоянного фонового сигнала ΔH_{ϕ} .

В связи с постоянством ΔH_{ϕ} показатель SBR вычисляется как

$$SBR = H_{pp} / \Delta H_{\phi},$$

где H_{pp} – размах зарегистрированного сигнала.

В частности, для рассматриваемого фрагмента распределения (см. рис. 3, а) $SBR = 16$, что значительно выше по сравнению с отношением сигнал–фон одинарного МИП.

По аналогичной методике выделяют информативный сигнал при применении дифференциального МИП, ориентированного на регистрацию нормальной составляющей напряжённости магнитного поля. Присутствующий на выходе МИП разностный фоновый сигнал остаётся практически постоянным на интервале $[(x - b), (x + b)]$, где $x_3 \leq x \leq x_4$ (см. рис. 2, б), и определяется приращением фактического фонового сигнала на отрезке длиной b . Расстояние b не должно превышать половину расстояния между точками 3, 4 распределения нормальной составляющей.

На рис. 3, б показан график разностного сигнала дифференциального МИП с преобразователями Холла (межцентровое расстояние $b = 3$ мм) при регистрации напряжённости магнитного поля дефекта глубиной 2 мм. Расстояние b выбрано

близким расстоянию между экстремумами распределения нормальной составляющей, которое по экспериментальным данным практически не зависит от глубины дефекта. Согласно экспериментальным результатам $SBR = 13$.

На практике при регистрации распределений напряжённости дифференциальным МИП постоянная фоновая составляющая аппаратно компенсируется до нулевого значения.

Следует отметить, что увеличение SBR при регистрации дифференциальными МИП достигается не только за счет отстройки от фонового поля, но и в связи с увеличением (до двух раз) оценочного параметра $H_{\max}$ информативного разностного сигнала. Однако эффективность дифференциального способа увеличения отношения SBR зависит от оптимального выбора расстояния между МИП. При малом расстоянии существенно уменьшается чувствительность преобразователя, а с увеличением этого расстояния возрастает фоновый сигнал.

Выходной сигнал индукционных МИП. Выходной сигнал таких МИП – электродвижущая сила (ЭДС) индукции – пропорционален скорости изменения напряженности магнитного поля. В условиях намагничивания контролируемого объекта постоянным магнитным полем регистрация распределений индуцированной ЭДС вдоль координаты x осуществляется только в динамическом режиме: с постоянной линейной скоростью или в режиме виброперемещения МИП.

Регистрация магнитных полей в режиме виброперемещения МИП более предпочтительна, так как осуществляется при статическом положении корпуса МИП относительно контролируемой поверхности. Вибрирует только индуктивная катушка МИП. Это позволяет проводить регистрацию распределений напряжённости на поверхности незначительных по размерам объектов, в том числе, сложнопрофильных как в автоматизированном, так и в ручном режиме. В данном случае выходной сигнал МИП является периодической функцией времени с основной частотой ω_0 , равной частоте виброперемещения индуктивной катушки.

Как показано в работе [8], в зависимости от положения виброиндукционного МИП относительно центра магнитного поля дефекта формируется специфический для данной точки амплитудный спектр выходного сигнала. При виброперемещении тангенциально ориентированного индукционного МИП над центром магнитного поля дефекта в спектре выходного сигнала в качестве значимых присутствуют гармоники с частотами $2\omega_0$, $4\omega_0$, причём существенно доминирует вторая гармоника $2\omega_0$. Выходной сигнал нормально ориентированного МИП при амплитуде колебаний над центром дефекта до 3 мм в качестве значимых содержит гармоники с частотой ω_0 , $3\omega_0$ с доминированием первой гармоники ω_0 . Для примера на рис. 4 представлена спектрограмма выходного напряжения нормально ориентированного индукционного МИП при его виброперемещении с частотой 120 Гц и амплитудой 2 мм над центром поверхностного дефекта глубиной 3 мм и шириной 0,1 мм.

Таким образом, в процессе сканирования контролируемой поверхности центр магнитного поля дефекта определяется

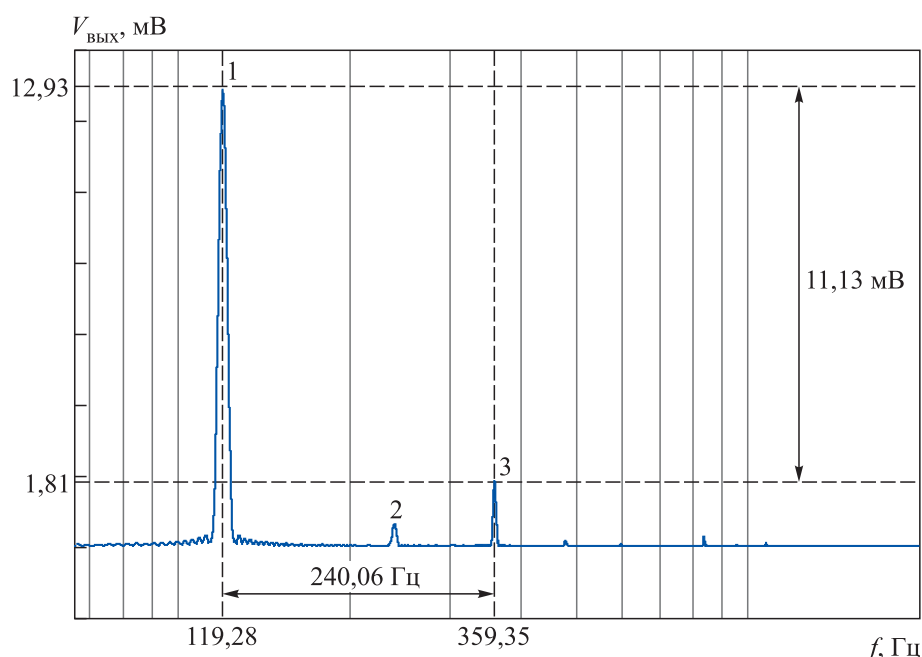


Рис. 4. Спектрограмма выходного напряжения нормально ориентированного индукционного МИП при колебаниях над дефектом; 1–3 – номера гармоник

Fig. 4. Spectrogram of the output signal during oscillations over the defect by the normally oriented MMT; 1–3 – harmonic numbers

по максимумам амплитуд первой и второй гармоник при регистрации соответственно по нормальной и тангенциальной составляющим. Обе выделенные из спектра сигнала гармоники содержат информативную и фоновую составляющую.

Для нормально ориентированного МИП информативная и фоновая составляющие первой гармоники суммируются, так как линейная часть информативного сигнала и интерполяционная прямая фоновой сигнала имеют отрицательный наклон. Тогда оценочный параметр информативной составляющей первой гармоники V_1 рассчитывается как

$$V_1 = 2\sqrt{2}(V_{\max 1} - V_{\phi 1}),$$

где $V_{\max 1}$ – измеренное амплитудное значение первой гармоники над дефектом; $V_{\phi 1}$ – измеренное амплитудное значение фоновой составляющей первой гармоники при отсутствии дефекта на том же участке контролируемой поверхности.

Таким образом, отношение сигнал–фон определяется выражением

$$SBR = V_1 / V_{\phi 1}.$$

Согласно экспериментальным данным, полученным авторами настоящей статьи, $SBR = 74$ для рассматриваемого МИП при его колебаниях с амплитудой 2 мм над дефектом глубиной 3 мм и шириной 0,1 мм.

В случае тангенциально ориентированного МИП информативная и фоновая составляющие второй гармоники выходного сигнала находятся в противофазе. Максимум фоновой

составляющей второй гармоники $V_{\phi 2}$ совпадает с центром распределения фоновой сигнала по координате x (см. рис. 1). В этом случае отношение сигнал–фон рассчитывается по формуле

$$SBR = 2\sqrt{2}(V_{\max 2} + V_{\phi 2}) / V_{\phi 2},$$

где $V_{\max 2}$ – измеренное амплитудное значение второй гармоники над дефектом; $V_{\phi 2}$ – измеренное амплитудное значение фоновой составляющей второй гармоники в центре распределения по координате x на бездефектном участке.

Значения SBR в этом случае имеют тот же порядок, что и при регистрации нормально ориентированным МИП.

Полученные расчётно-экспериментальные оценки SBR МИП рассмотренных типов свидетельствуют о значительном преимуществе применения виброиндукционных МИП.

Увеличение отношения SBR является одним из факторов повышения точности измерения параметров дефекта. Оценка влияния отношения SBR на погрешность измерения параметров дефекта зависит

от вида функции, описывающей зависимость информативного параметра выходного сигнала МИП от значений контролируемого параметра дефекта. В линейном приближении относительная погрешность измерения контролируемого параметра q обратно пропорциональна значению SBR : $\delta_q = (SBR)^{-1}$.

Заключение. Рассмотренные методическое и техническое обеспечения оценки SBR , а также рекомендации по отстройке от фоновой составляющей целесообразно использовать при экспериментальной отработке методик дефектоскопии контролируемых объектов с целью выбора эффективного способа повышения отношения SBR .

Описанная методика выделения информативного сигнала при регистрации магнитных полей дефектов посредством МИП может использоваться при решении задачи идентификации распределения напряжённости по экспериментальным данным и выполнения дефектометрических оценок с использованием контрольных образцов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке со стороны системы мотивирующих выплат и оценки эффективности профессорско-преподавательского состава Российского технологического университета (НИР № 41-ФТИ).

Список литературы

1. Реутов Ю. Я., Щербинин В. Е., Волков А. В. Возможности выбора преобразователей магнитного поля для дефектоскопии // Дефектоскопия. 2014. № 12. С. 71–85. DOI: 10.1134/S1061830914120080

2. Немцов М. В., Трифанов Г. Д. Индукционный датчик определения локальных дефектов в стальных канатах // Измерительная техника. 2018. № 2. С. 55–58. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-2-55-58
3. Серов В. Н., Фетисов Л. Ю., Фетисов Ю. К., Шестakov Е. И. Высокочувствительный магнетометр на основе магнитоэлектрического датчика // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 5. С. 24–37. DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37
4. Брякин И. В. Магнитодинамический магнетометр для задач дефектоскопии // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 3. С. 35–41.
5. Ключев В. В., Мужикский В. Ф., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. / Под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 6. Кн.1. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2006, 848 с.
6. Бакунов А. С., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е. Магнитный контроль: Учеб. пособие / Под общ. ред. В. В. Ключева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011, 192 с.
7. Карпов Д. А., Струченков В. И. Динамическое программирование как метод сплайн-аппроксимации в САПР линейных сооружений // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 77–88. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88
8. Николаев Ю. Л., Шкатов П. Н., Чернова А. В., Саморуков А. А. Моделирование и гармонический анализ сигнала виброиндукционного преобразователя при его перемещении над намагниченным участком с поверхностной трещиной // Приборы. 2019. № 4. С. 17–25.

References

1. Reutov Y. Y., Shcherbinin V. E., Volkov A. V., *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, vol. 50, no. 12, pp. 760–768. DOI: 10.1134/S1061830914120080
2. Nemtsov M. V., Trifanov G. D., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 2, pp. 166–171. DOI: 10.1007/s11018-018-1404-7
3. Serov V. N., Fetisov L. Y., Fetisov Y. K., Shestakov E. I., *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*, 2016, vol. 4, no. 5, pp. 24–37 (in Russian). DOI: 10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37
4. Bryakin I. V., *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 35–41 (in Russian).
5. Klyuev V. V., Muzhitskii V. F., Gorkunov E. S., and Shcherbinin V. E., *Nerazrushayushchii kontrol'*, a handbook in 8 vol., vol. 6, book 1 “Magnetic Methods of Testing”, ed. Klyuev V. V., Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 848 p. (in Russian).
6. Bakunov A. S., Gorkunov E. S., and Shcherbinin V. E., *Magnitnyi kontrol'*, a handbook, ed. V. V. Klyuev, Moscow, Spektr Publ., 2011, 192 p. (in Russian).
7. Karpov D. A., Struchenkov V. I., *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal*, 2019, vol. 7, no. 3, pp. 77–88. (in Russian). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-77-88
8. Nikolaev Yu. L., Shkatov P. N., Chernova A. V., Samorukov A. A., *Instruments*, 2019, no. 4, pp. 17–25.

Дата поступления: 27.08.2019.

Дата принятия: 24.12.2019.

Estimation of informative and background signals ratio in the registration of magnetic fields of surface defects by magnetic measuring transducers

Yuriy L. Nikolaev, Elina F. Akhmetshina, Aleksey A. Samorukov, Aleksandra V. Chernova

Physical and Technological institute of "MIREA – Russian Technological University", Moscow, Russian Federation,
e-mail: nikolaev_yu@mirea.ru, elina.ahmetschina@yandex.ru, samorukov.alexey@gmail.com, aleks.chernova@gmail.com

Authors propose algorithms for quantitative ratio determining of informative and background components of the output signal of magnetic measuring transducers, used as a means of recording and measuring the parameters of locally distributed magnetic fields that occur over defective surface areas of the tested object in an applied permanent magnetic field. The method of separating the informative and background components based on the summation property and the deterministic nature of the distributions of the magnetic field intensity of the defect and the background magnetic field along the coordinate axis parallel to the controlled surface, and analysis of the topography of the distribution of magnetic field intensity is described. The approach to selection and experimental determination of estimated parameters characterizing the levels of informative and background signals is justified. Authors give the formulas for calculating the signal-to-background ratio based on the measured values of the estimated parameters applied to single magnet-static, differential magnet-static and differentiating magnetic measuring transducers taking into account the orientation direction (normal, tangential) of their sensitivity axis. The signal-to-background ratio calculation results are presented using an example of an analysis of the magnetic measuring transducers output signal when registering the distribution of the magnetic field intensity over the surface of a control sample with artificial defects of a given size. The comparative analysis of considered magnetic measuring transducers according to signal-to-background ratio is carried out. General recommendations to increase the value of the signal-to-background ratio parameter are given.

Key words: magnetic measuring transducers (MMT), magnetic field of defect, signal to background ratio (SBR).

Алгоритмическая коррекция инструментальных погрешностей магнитометра

Ю. Г. Астраханцев, Н. А. Белоглазова

Институт геофизики им. Ю. П. Булашевича Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: skvgeoph@mail.ru, bna408@mail.ru

Рассмотрены вопросы применения градиентометрии в магниторазведке. Во многих случаях для решения разных геологических задач важна информация о напряжённости геомагнитного поля и его градиентах, измеряемых специальной аппаратурой. Приведены результаты разработки и построения трёхкомпонентного феррозондового магнитометра-градиентометра, предназначенного для измерений на земной поверхности абсолютных значений трёх составляющих вектора напряжённости геомагнитного поля и соответствующих им трёх составляющих градиента. Установка в приборе дополнительных измерительных датчиков – акселерометров, позволяет вычислять ориентацию этих векторов в пространстве. Описано устройство магнитометра-градиентометра, представлена его функциональная схема и принцип работы. Рассмотрена совокупность инструментальных погрешностей, возникающих при изготовлении трёхосевых систем феррозондов и акселерометров, предназначенных для измерения составляющих напряжённости геомагнитного поля и определения ориентации прибора. Представлена методика нахождения инструментальных погрешностей и алгоритмической коррекции информационных сигналов, которые поступают от измерительных датчиков. Показано, что данная методика обеспечивает существенное повышение точности измерений. Приведены примеры полевых испытаний прибора. Представленный магнитометр-градиентометр можно использовать для точной локализации тектонических нарушений, маломощных зон магнитной минерализации, ранее выявленных рудных тел и определения деталей их строения.

Ключевые слова: магнитометр-градиентометр, градиент геомагнитного поля, магниторазведочная аппаратура, алгоритмическая коррекция, феррозондовые датчики.

Введение. В магниторазведке под градиентами геомагнитного поля понимают производные скалярной функции по заданным направлениям, т. е. понятие «градиент» отождествляется с понятием «составляющая вектора градиента». Однако на практике вместо направленных производных приходится оперировать конечными разностями значений элементов земного магнетизма, приведёнными к размеру базы. Эти значения можно найти по одному из горизонтальных направлений или по вертикали. Таким образом, значение градиента приписывается точке пространства, находящейся в середине базы [1]. Из всего круга задач градиентометрии наибольший интерес представляет определение локальных неоднородностей сверхслабых магнитных полей в пределах естественных вариаций геомагнитного поля. Вычислять или измерять градиент необходимо и при детальной разведке месторождений с неглубоким залеганием магнитных пород для более точной локализации рудных тел и решения других задач, связанных с разделением по магнитному полю влияния различных объектов. Такие измерения особенно важны при сложных аномалиях, когда магнитные поля крупных и мелких тел накладываются одно на другое [2]. При этом вертикальный градиент содержит информацию о глубине залегания возмущающего объекта, в то время

как горизонтальный градиент выделяет границы объекта в горизонтальной плоскости неоднородностей.

Градиент магнитного поля можно измерить двумя способами:

с помощью магнитометров, устанавливая их на разных высотах и относя полученную разность измерений к единице расстояния между уровнями измерений;

специальными магнитометрами-градиентометрами, конструкция которых позволяет сразу получать значения градиентов.

Непосредственные градиентные измерения элементов магнитного поля имеют значительное преимущество перед наблюдениями значений элемента при обнаружении или индикации сравнительно мелких магнитных объектов, залегающих на глубине не более 6–7 м от уровня съёмки. Однако это верно только в том случае, когда погрешности градиентных измерений не превышают погрешности измерений магнитного поля. Кроме того, данная проблема тесно связана с аппаратурными возможностями [3].

Аппаратура для измерения магнитного поля и градиентов. В настоящее время широкое распространение получили магнитометры-градиентометры, измеряющие градиент ΔT полного вектора геомагнитного поля или его вертикальной составляющей ΔZ [4]. Измерение модуля градиента вертикальной составляющей магнитного поля является наиболее

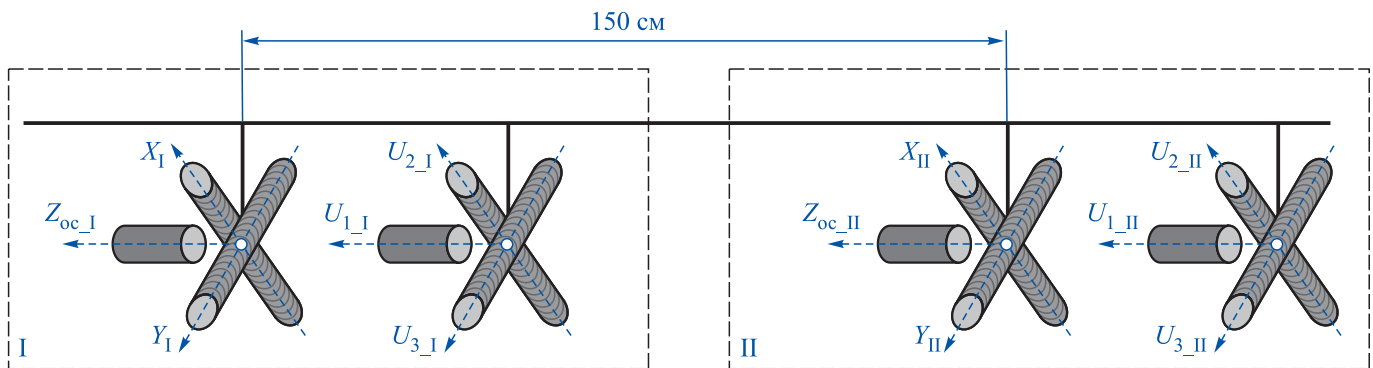


Рис. 1. Схематическое расположение измерительных датчиков в магнитометре-градиентометре МГП-02

Fig. 1. Schematic arrangement of measuring sensors in the magnetometer-gradimeter MGP-02

простым в исполнении способом и характеризуется наименьшей погрешностью измерений. Но круг задач, которые можно решить методом трёхкомпонентной градиентометрии магнитного поля, при этом способе заметно сужается.

Низкий порог чувствительности, наличие диаграммы направленности, простота конструкции, надёжность и высокое быстродействие сыграли первостепенную роль при выборе типа датчиков для построения магнитометрической аппаратуры. В настоящее время широкое применение нашли магнитометрические приборы, реализованные на феррозондовых датчиках [5, 6]. Существует опыт создания и двухкомпонентных магнитометров-градиентометров (Лаборатория независимых исследований: [сайт И. А. Мухина] URL: http://imlab.narod.ru/M_Fields/Dig_Magn_Grad/Dig_Magn_Grad.htm). При обнаружении скрытых в приповерхностных слоях Земли ферромагнитных объектов и разделении сложных аномалий большое значение имеет размер измерительной базы прибора. Чем больше измерительная база, тем шире радиус исследований, но погрешность измерений при этом также увеличивается. Поэтому при конструировании градиентометров и выборе размера измерительной базы необходимо руководствоваться поставленными задачами исследований.

В лаборатории скважинной геофизики Института геофизики УрО РАН разработан рабочий макет трёхкомпонентного пешеходного магнитометра-градиентометра МГП-02. Данный макет предназначен для измерений на земной поверхности абсолютных значений трёх составляющих вектора геомагнитного поля – вертикальной Z , горизонтальной в плоскости наклона прибора H_X и H_Y , являющейся горизонтальной, ортогональной H_X . Кроме того, с помощью разработанного макета можно измерять три составляющие градиента геомагнитного поля. Такой прибор можно использовать для более точной локализации ранее выявленных рудных тел и определения деталей их строения. Установка дополнительных измерительных модулей – акселерометров, позволяет не только измерить вектор полного геомагнитного поля, его составляющие и их градиенты, но и вычислить в пространстве ориентацию этих векторов.

На рис. 1 представлена структурная схема разработанного магнитометра-градиентометра. Здесь I, II – измерительные модули (магнитометры), каждый из которых содержит две взаимноортогональные системы датчиков, установленных между собой соосно:

магнитные датчики (феррозонды) X , Y , Z , предназначенные для измерений составляющих геомагнитного поля;

гравитационные датчики (акселерометры) U_1 , U_2 , U_3 для определения ориентации феррозондов относительно плоскости наклона прибора.

Магнитометр-градиентометр МГП-02 имеет типичную структуру градиентометра с двумя измерительными модулями, идентичными по характеристикам и разнесёнными в пространстве на базовое расстояние 150 см. Размер базы выбирали исходя из соотношения допустимой погрешности измерений и радиуса исследований. На рис. 2 изображена функциональная схема рассматриваемого магнитометра-градиентометра МГП-02. Этот магнитометр работает на удвоенной частоте с синхронным детектированием и глубокой отрицательной связью [7, 8]. Сигналы феррозондов обоих измерительных модулей из блока первичных преобразователей 1 через коммутатор 2 поступают на вход измерительной схемы магнитометра 4, работающей в режиме временного разделения каналов. Аналогично сигналы акселерометров через коммутатор 3 поступают на вход измерительной схемы сигналов акселерометров 5. Схема прибора содержит фильтры нижних частот для устранения высокочастотных сигналов вибрации и высокоомный повторитель напряжения. Ступенчатые сигналы постоянного тока с выходов блоков 4, 5 попадают на входы аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 6. В данной конструкции применён АЦП двойного интегрирования со временем заряда конденсатора 20 мс. Это позволяет полностью исключить помехи частотой 50 Гц. Выходной сигнал АЦП в виде параллельного двоичного кода поступает на входы блока памяти 7 и записывается в него. В режиме считывания параллельный двоичный код подаётся в регистр сдвига 8 и далее на выходной ключ 9, который обеспечивает в каждом

также передачи информации паузу для синхронизации её приема компьютером. Блок управления 10 обеспечивает последовательность работы всех блоков. Блок питания прибора 11 присоединён к аккумулятору, установленному в пульте управления.

Измеряемые сигналы, поступающие с феррозондов и акселерометров, функционально связаны с углами пространственной ориентации корпуса скважинного прибора. Как сказано выше, полный вектор геомагнитного поля, измеряемый каждой системой датчиков, можно представить тремя составляющими: вертикальной Z ; горизонтальной в плоскости наклона прибора H_X и горизонтальной H_Y , ортогональной H_X . При установке штанги прибора в субгоризонтальном положении измеряют горизонтальные составляющие градиента магнитного поля, при субвертикальном – вертикальные составляющие. Для их определения в каждом измерительном модуле использована система измерительных датчиков, состоящая из трёх ортогонально расположенных жёстко закреплённых феррозондов и трёх акселерометров, направления осей чувствительности которых соответствуют осям чувствительности феррозондов. Истинные значения составляющих вектора геомагнитного поля и угловых параметров прибора в системе координат, привязанной к плоскости наклона прибора, определим по следующим формулам:

$$Z = -X_{\text{и}} \cos \alpha \sin \varphi - Y_{\text{и}} \sin \alpha \sin \varphi + Z_{\text{ос}} \cos \varphi;$$

$$H_X = X_{\text{и}} \cos \alpha \cos \varphi + Y_{\text{и}} \sin \alpha \cos \varphi + Z_{\text{ос}} \sin \varphi;$$

$$H_Y = -X_{\text{и}} \sin \alpha + Y_{\text{и}} \cos \alpha,$$

где $Z_{\text{ос}}$ – измеренный сигнал, поступающий с осевого феррозонда; $X_{\text{и}}$, $Y_{\text{и}}$ – измеренные сигналы, поступающие с феррозондов X , Y ; $\alpha = \arctg(U_2/U_3)$ – угол поворота системы акселерометров относительно плоскости наклона прибора в данной точке (визирный угол); $\varphi = \arctg[(\sqrt{U_2^2 + U_3^2})/U_1]$ – угол отклонения продольной оси прибора от вертикали (зенитный угол).

Угловые параметры α , φ прибора рассчитываются исходя из показаний акселерометров U_1 , U_2 , U_3 .

Магнитный азимут AZ и модуль горизонтальной составляющей H вычислим по соответствующим формулам [8]:

$$AZ = \arctg \frac{H_X}{H_Y};$$

$$H = \sqrt{H_X^2 + H_Y^2}.$$

Анализ влияния инструментальных погрешностей прибора на точность измерений. Разработка и создание трёхкомпонентных магнитометров-градиентометров с использованием систем определения ориентации феррозондов и их конструкторско-технологическая проработка находятся в неразрывной связи с исследованиями и разработками методов повышения точности измерений, а также применением методов математической коррекции инструментальных погрешностей [10–13].

В гравитационном канале прибора используются акселерометры АТ-1306 (НПО «Темп-Авиа», Россия), имеющие рабочую температуру в диапазоне -50 – 120 °С, при этом их коэффициент преобразования изменяется в пределах $1,105$ – $1,118$, а уход нуля – в интервале 14 – $7,5 \cdot 10^{-3}$ g. В блоке акселерометров установлен термометр, относительно показаний которого в расчётные параметры вносятся поправки, снижающие температурные погрешности акселерометров более чем в 10 раз по сравнению с паспортными данными. В магнитном канале прибора задействованы дифференциальные феррозонды. В качестве сердечника применён аморфный сплав 71КНСР, разработанный в Институте физики металлов УрО РАН [14]. При использовании материала сердечников из одной партии дрейф нулевого уровня феррозонда

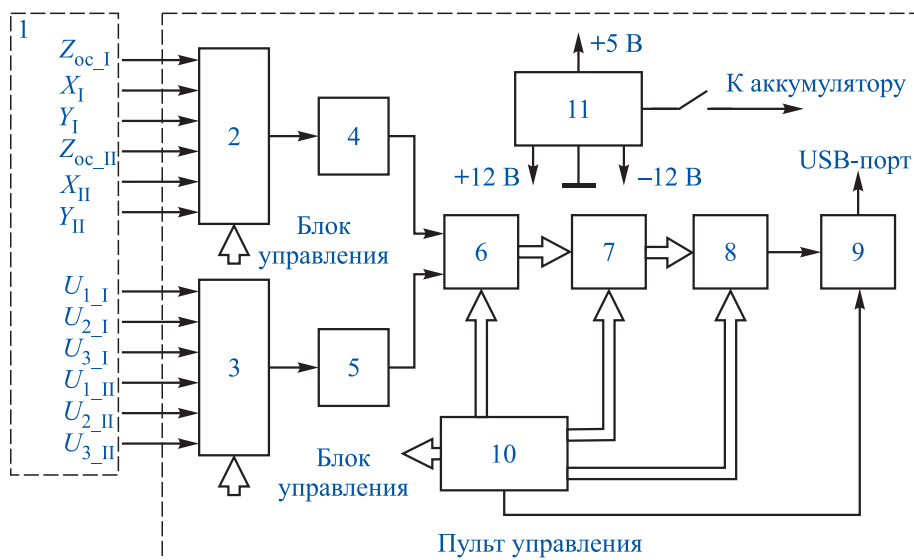


Рис. 2. Функциональная схема магнитометра-градиентометра МГП-02:

1 – блок первичных преобразователей; 2, 3 – коммутаторы; 4 – измерительная схема магнитометра; 5 – измерительная схема сигналов акселерометров; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – блок памяти; 8 – регистр сдвига; 9 – выходной ключ; 10 – блок управления; 11 – блок питания прибора

Fig. 2. Functional diagram of the magnetometer-gradimeter MGP-02:

1 – the block of primary converters; 2 – switch; 3 – switch; 4 – measuring circuit of the magnetometer; 5 – accelerometer measurement circuit; 6 – analog to digital converter; 7 – memory block; 8 – shift register; 9 – output key; 10 – control block; 11 – power supply unit

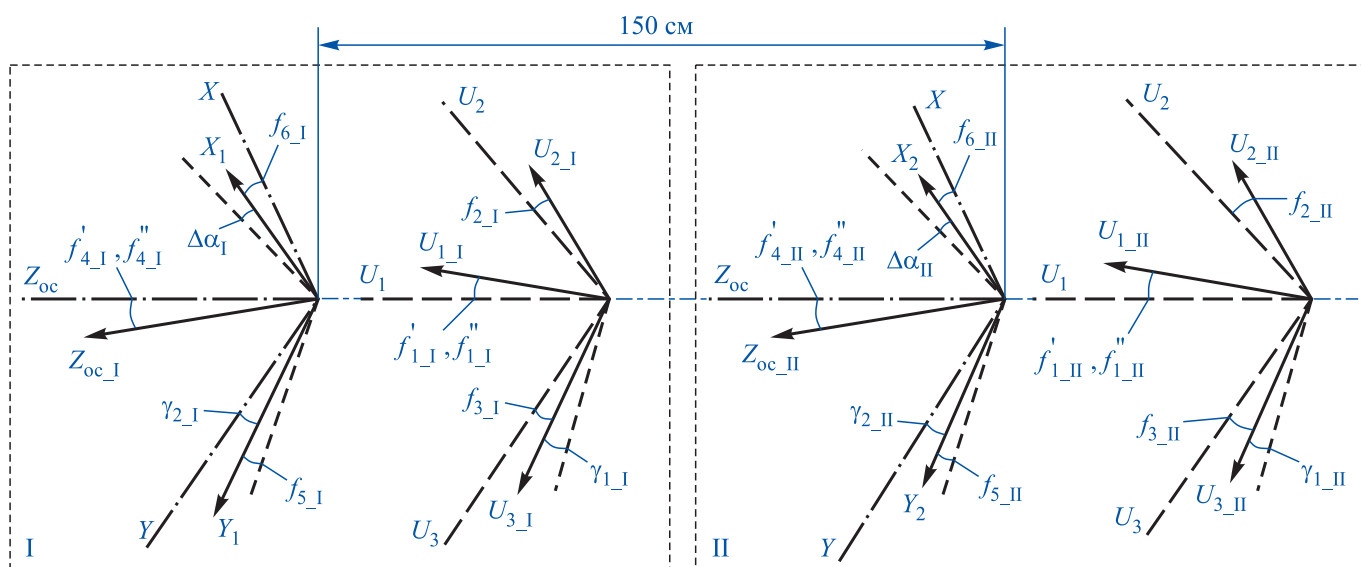


Рис. 3. Источники инструментальных погрешностей при изготовлении систем феррозондов и акселерометров

Fig. 3. Sources of instrumental errors in the production of fluxgate and accelerometers systems

в диапазоне рабочих температур прибора не превышает $\pm 1,5$ нТл. Глубокая отрицательная обратная связь, которой охвачен магнитометр-градиентометр, позволяет получить высокую стабильность чувствительности феррозондов. Кроме того, считывание данных термометра блока акселерометров, установленного в непосредственной близости от феррозондов, позволяет вносить температурные поправки и в показания магнитных датчиков. Таким образом, конструкция прибора и внесение температурных поправок позволяют получить высокую стабильность метрологических характеристик магнитометрических и акселерометрических каналов и исключить температурный дрейф.

Для определения временного дрейфа магнитометрических каналов прибора в магнитном павильоне обсерватории «Арти» в течение 2,5 ч проводили стендовые испытания при нормальных температурах в экране, а также в условиях «нормального поля». После осреднения и ввода поправок временной дрейф составляющих геомагнитного поля составлял до 2 нТл в экране и до 3 нТл в «нормальном поле».

Особое место в совокупности параметров, влияющих на метрологические характеристики прибора, занимают погрешности, которые обусловлены его конструктивным исполнением. В данном случае – это ряд конструкторско-технологических параметров, таких как неортогональная ориентация осей чувствительности первичных преобразователей по отношению к опорным базисам прибора, непараллельное расположение осей чувствительности измерительных датчиков и др. [15, 16]. Погрешности, характеризующие конструктивное исполнение аппаратуры, являются систематическими для каждого конкретного прибора и вносят мультипликативные помехи в результаты измерений [17].

На рис. 3 изображены углы перекоса осей измерительных датчиков, возникающих при изготовлении трёхосевых измерительных систем феррозондов и акселерометров, где f_1', f_1'' – углы между осью скважинного прибора и осью чувствительности акселерометра U_1 ; f_2, f_3 – углы отклонения от ортогональности осей скважинного прибора и акселерометров U_2, U_3 ; f_4', f_4'' – углы между осью скважинного прибора и осью чувствительности феррозонда Z; f_5 – угол отклонения от ортогональности осей скважинного прибора и феррозонда Y; f_6 – угол отклонения от ортогональности осей скважинного прибора и феррозонда X; γ_1 – угол отклонения от ортогональности акселерометров U_2, U_3 ; γ_2 – угол отклонения от ортогональности феррозондов X, Y; $\Delta\alpha$ – угол между осями феррозонда X и акселерометра U_2 .

Настроечные работы проводили на инклинометрическом столе УКИ-2, установленном в отдельном магнитном павильоне обсерватории «Арти». В павильоне были созданы все условия для соблюдения однородности геомагнитного поля в объёме размещения градиентометра. Цифровые магнитовариационные станции обсерватории Кварц-ЗЕМ и Кварц-4, имеющие чувствительность 0,1 нТл/деление, обеспечивали непрерывную круглогодичную регистрацию вариаций компонент магнитного поля Земли, т. е. его продольной X , поперечной Y и вертикальной составляющей Z . С помощью протонного магнитометра POS-1, имеющего среднее квадратическое отклонение случайной погрешности менее 0,1 нТл и основанного на эффекте Оверхаузера, определяли модуль вектора напряжённости магнитного поля индукции F . Ежедневно посредством теодолита 3Т2КП, оснащённого феррозондовым датчиком для наблюдений угла склонения D и наклона I модуля вектора F магнитной индукции, измеряли абсолютные значения этих величин

с точностью 10 с. Абсолютные значения модуля полного вектора геомагнитного поля в 2019 г. находились в пределах 56523 нТл. Для определения неоднородности магнитного поля в объёме размещения магнитометра-градиентометра провели предварительные измерения магнитного поля магнитометром POS-1. В результате измерений максимальные расхождения абсолютных значений магнитного поля составили 3,5 нТл.

В идеальном случае оси чувствительности феррозондов X , Y , Z_{oc} и акселерометров U_1 , U_2 , U_3 должны быть направлены по осям базиса корпуса прибора и соосны между собой. На практике углы отклонения осей чувствительности первичных преобразователей от осей базиса прибора могут достигать 5° . Совокупность инструментальных погрешностей, возникающих при изготовлении измерительных систем с жёстко закрепленными датчиками, оказывает существенное влияние на точность измерения составляющих геомагнитного поля и определения ориентации прибора.

Методика настройки магнитометра-градиентометра.

В настоящей работе авторы представляют методику, разработанную для определения выходных параметров первичных преобразователей, жёстко закрепленных в корпусе скважинного прибора при испытаниях в немагнитном поворотном инклинометрическом столе, который обеспечивает повышенную жёсткость при установке прибора и точность задания азимута, зенитного и визирного углов. С помощью несложной алгоритмической основы математической коррекции сигналов, полученных с измерительных датчиков, определяются инструментальные погрешности прибора и их влияние на точность измерений.

Настройку каждой измерительной системы производили отдельно, так как инструментальные погрешности каждой системы индивидуальны. Осью прибора являлась ось штанги, совпадающая с осями чувствительности феррозондов $Z_{oc.I}$, $Z_{oc.II}$ и акселерометров $U_{1.I}$, $U_{1.II}$ (см. рис. 1). Основное условие проведения настроечных работ – однородность магнитного поля в месте установки инклинометрического стола.

Суть методики определения инструментальных погрешностей изготовления прибора заключается в следующем. Прибор последовательно ориентируют в пространстве так, чтобы вклад каждой соответствующей составляющей системы акселерометров или феррозондов принимал определённое значение, при котором влияние на него инструментальных погрешностей будет максимально (при нахождении углов несоосности и неортогональности осей первичных преобразователей) или, наоборот, ничтожно мало (при определении нулевого уровня сигнала и коэффициентов преобразования первичных преобразователей).

В процессе измерений регистрируют параметры $Z_{и}$, $X_{и}$, $Y_{и}$, $U_{1и}$, $U_{2и}$, $U_{3и}$. Чтобы привести их к истинным значениям, связанным с системой координат прибора, воспользуемся формулами преобразования прямоугольных координат. Тогда выходные параметры первичных преобразователей вычислим по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1(U_{1и} - U_{10}) - K_2(U_{2и} - U_{20})\sin f'_1 - \\ &\quad - K_3(U_{3и} - U_{30})\cos f''_1; \\ U_2 &= K_2(U_{2и} - U_{20}) - K_1(U_{1и} - U_{10})\sin f_2; \\ U_3 &= K_3(U_{3и} - U_{30}) - K_1(U_{1и} - U_{10})\sin f_3 - \\ &\quad - K_2(U_{2и} - U_{20})\sin \gamma_1; \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{oc} &= K_Z(Z_{и} - Z_0) - K_X(X_{и} - X_0)\cos f'_4 - \\ &\quad - K_Y(Y_{и} - Y_0)\sin f''_4; \\ X &= K_X(X_{и} - X_0) - K_Z(Z_{и} - Z_0)\sin f_5; \\ Y &= K_Y(Y_{и} - Y_0) - K_Z(Z_{и} - Z_0)\sin f_6 - \\ &\quad - K_X(X_{и} - X_0)\sin \gamma_2; \end{aligned} \right\}$$

$$\alpha = \alpha_{и} \pm \Delta\alpha,$$

где $U_{1и}$, $U_{2и}$, $U_{3и}$, $X_{и}$, $Y_{и}$, $Z_{и}$ – показания соответствующих акселерометров и феррозондов; U_{10} , U_{20} , U_{30} , X_0 , Y_0 , Z_0 – смещения нулевого уровня сигналов первичных преобразователей; K_1 , K_2 , K_3 , K_X , K_Y , K_Z – коэффициенты передачи первичных преобразователей; f'_1 , f''_1 , f_2 , f_3 , f'_4 , f''_4 , f_5 , f_6 , γ_1 , γ_2 – углы отклонений осей первичных преобразователей от базисов прибора; $\alpha_{и}$ – измеренный визирный угол; $\Delta\alpha$ – угол между осями феррозонда X и акселерометра U_2 .

Определение нулевого уровня сигналов и коэффициентов преобразования акселерометров и феррозондов.

Нулевым уровнем выходного сигнала измерительного датчика принято считать погрешность его показаний при отсутствии влияния измеряемых полей. Нулевые сигналы U_{20} , U_{30} акселерометров, расположенных ортогонально к оси магнитометра-инклинометра с шагом 90° , определяют при вращении прибора вокруг продольной оси. Корпус прибора закрепляют на инклинометрическом столе строго горизонтально, зенитный угол $\varphi = 90^\circ$. Выходное значение, которое снимается с акселерометра U_2 , расположенного по линии силы тяжести, т. е. вниз, будет положительно и максимально ($U_{2max(+)}$). При этом показание ортогонального к нему акселерометра U_3 будет близко к нулю. При повороте прибора по часовой стрелке на 90° значение U_3 , наоборот, будет максимально положительным ($U_{3max(+)}$), а значение U_2 – стремиться к нулю. При последующих поворотах значения, снимаемые с акселерометров, ориентированных вверх, т. е. против силы тяжести, будут максимально отрицательны и составят $U_{2max(-)}$, $U_{3max(-)}$. Искажения же выходных параметров акселерометров U_2 , U_3 , связанные с отклонением их осей от осей базиса прибора, практически не скажутся.

Коэффициент преобразования осевого акселерометра условно примем за единицу, тогда за счёт коэффициентов K_2 , K_3 приведём уровень выходных параметров акселерометров U_2 , U_3 к выходному уровню акселерометра U_1 . Для определения U_{10} – смещения нуля осевого акселерометра U_1 – прибор закрепляют в инклинометрическом столе строго вертикально. Максимально положительное значение

$U_{1\max(+)}$ соответствует положению прибора, когда осевой акселерометр расположен по направлению силы тяжести ($\varphi=0$), а максимально отрицательное значение $U_{1\max(-)}$ снимается при ориентировании осевого акселерометра U_1 против силы тяжести ($\varphi=180^\circ$). «Нули» акселерометров U_{20} , U_{30} , установленных перпендикулярно оси скважинного прибора, определяются при установке оси прибора перпендикулярно направлению вектора силы тяжести и его полном повороте по визирному углу. «Нули» X_0 , Y_0 феррозондов X , Y , соосных с акселерометрами U_2 , U_3 , найдём при установке оси прибора перпендикулярно направлению вектора геомагнитного поля и его полном повороте по визирному углу α с шагом 90° . Таким образом, имеет место методика четырёх положений. Нулевой уровень Z_0 осевого феррозонда Z вычислим по аналогии с осевым акселерометром U_1 , но в данном случае прибор установим по направлению и против направления вектора геомагнитного поля. Коэффициенты преобразования K_X , K_Y , K_Z предварительно определим при градуировке прибора в градуировочных кольцах, где за базисное значение примем сигнал Z_u . Затем коэффициенту K_Z присвоим значение «1», а коэффициенты K_X , K_Y приведём к коэффициенту K_Z .

Все полученные «нули» и коэффициенты преобразования необходимо внести в корректирующий файл первичных поправок.

Определение углов несоосности и отклонения от ортогональности осей измерительных систем. После вычисления «нулей» и коэффициентов преобразования определяются углы несоосности и отклонения от ортогонального положения измерительных систем. Эти параметры можно найти с помощью программного модуля, входящего в состав программного обеспечения прибора, которое позволяет путём полуавтоматического подбора определить значения углов $f_1 - f_6$ с точностью до десятых долей угловых минут. Все подобранные таким образом коэффициенты преобразования, «нули» и углы отклонения измерительных систем от осей базиса заносятся в корректирующий файл, который участвует при обработке измерений в рабочем режиме.

Измерение и расчёт вторичных поправок. Вторичные поправки вычисляются по результатам эталонных измерений, которые проводятся при осевом вращении блоков первичных преобразователей в нормальном магнитном поле с жёстким закреплением штанги в инклинометрическом столе. Дискретность измерений по зенитному углу составляет 5° . Для каждого установленного угла производится полная прокрутка прибора по апсидальному углу α через 30° для каждого значения азимута. По азимуту также происходит полный оборот прибора с дискретностью 30° , т. е. $0, 30, 60, \dots, 330^\circ$. Для каждого зенитного угла создаётся 12 таблиц, соответствующих 12 азимутам. После записи всего массива данных рассчитываются вторичные поправки исходя из функциональной независимости вычисленных физических параметров от осевого вращения прибора.

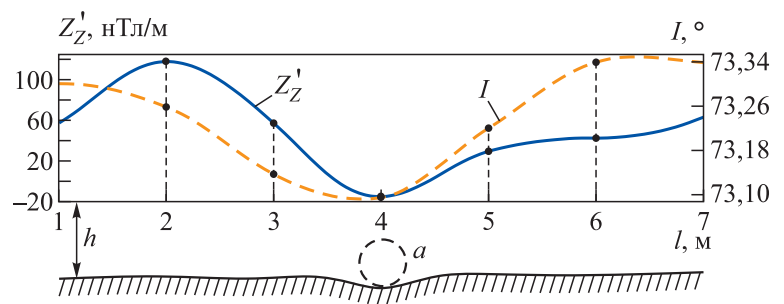


Рис. 4. Измерения элементов магнитного поля, создаваемого металлической трубой, с помощью магнитометра-градиентометра: a – металлическая труба; Z'_Z – модуль вертикального градиента вертикальной составляющей вектора геомагнитного поля; I – наклонение вектора геомагнитного поля; h – высота штатива

Fig. 4. Measurements with a magnetometer-gradientometer over a metal pipe: a – a metal pipe; Z'_Z – modulus of the vertical gradient of the vertical component of the geomagnetic field vector; I – geomagnetic field vector inclination, h – tripod height

Вычисляется отклонение измеренных параметров от теоретических. При этом во всех формулах для расчёта составляющих геомагнитного поля применяются все ранее вычисленные погрешности и коэффициенты, записанные в файлах первичных поправок. Результаты расчётов заносятся в таблицы вторичных поправок.

После настройки, выполненной в обсерватории «Арти» в условиях нормального магнитного поля на трёхосевом инклинометрическом столе УКИ-2, удалось добиться абсолютных погрешностей измерения составляющих геомагнитного поля в пределах $5-20$ нТл. Такие значения применительно к абсолютным значениям геомагнитного поля на территории обсерватории составляют $0,01-0,04\%$. Кроме того, определили положение вектора геомагнитного поля в пространстве с точностью до $0,03^\circ$, что сопоставимо с наблюдениями приборов обсерватории. Достигнутая точность измерений сохраняется при измерениях составляющих вектора геомагнитного поля в пределах ± 80000 нТл. Собственный шум прибора при измерениях полного вектора геомагнитного поля после ввода всех поправок снизился с уровня ± 200 до ± 2 нТл.

Для проверки работы аппаратуры и программного обеспечения авторы настоящей статьи провели полевые измерения магнитного поля объектов, положение которых в пространстве известно. Источником аномального магнитного поля служила металлическая труба, лежащая на поверхности (рис. 4). Измерения проводили по профилю непосредственно над трубой. Над трубой возникает довольно сильное ($350-400$ нТл) аномальное поле. Измерения элементов магнитного поля производили по профилю, проходящему перпендикулярно продольной оси трубы на расстоянии $1,25$ м от её торца. Расстояние l между точками измерений равно 1 м. Методика измерений для получения всех элементов тензора включает в себя измерения при трёх положениях прибора. Высота треноги, на которой

крепилась штанга прибора, составляла 150 см. В первом положении штангу градиентометра установили горизонтально по направлению профиля измерений, а во втором положении её повернули на 90° и разместили перпендикулярно профилю. В третьем положении штангу разместили в вертикальном положении. При каждой ориентации прибора измеряли три составляющие геомагнитного поля, азимут магнитного склонения горизонтальной составляющей и угловые параметры установки измерительных датчиков. Совокупность всех измерений образует массив данных, на основе которых можно рассчитать все градиенты полного поля T и все градиенты составляющих этого вектора в принятой для полевой магнитометрии декартовой системе координат Z , H_x , H_y . Таким образом, дополнительно можно вычислить и построить в пространстве векторы градиента полного поля ($\text{grad } T$) и векторы градиента аномального поля ($\text{grad } T_a$).

Из рис. 4 следует, что уже на подходе к искомому объекту градиент вертикальной составляющей вектора геомагнитного поля изменяется на 130 нТл, а наклонение вектора геомагнитного поля – на $0,24^\circ$. Возможность представленного магнитометра-градиентометра регистрировать аномалии магнитного склонения такой величины свидетельствует о довольно высокой точности измерений элементов магнитного поля и их ориентации.

Заключение. Непосредственные инструментальные определения градиентов геомагнитного поля заведомо перспективны, если погрешность их измерения существенно ниже погрешности измерения абсолютных значений поля. Поэтому данная проблема тесно связана с аппаратными возможностями обеспечения заданной точности измерений. В статье рассмотрен аппаратный аспект использования феррозондовых датчиков и акселерометров для непосредственного измерения трёх компонент вектора градиента магнитного поля. Предложенный способ математической коррекции инструментальных погрешностей, неизбежно возникающих при построении прибора, позволил добиться приемлемой точности измерений. Измеренные градиенты составляющих геомагнитного поля не зависят от вариаций магнитного поля. При возможности обеспечения определённого азимута появляется дополнительная информация, позволяющая определять направление на магнитный объект из точки измерений.

Список литературы

1. Инструкция по магниторазведке (наземная магнитная съёмка, аэромагнитная съёмка, гидромагнитная съёмка). Л.: Недра, 1981. 263 с.
2. Логачев А. А., Захаров В. П. Магниторазведка. Изд. 5-е, перераб. и доп. Л.: Недра, 1979. 351 с.
3. Звежинский С. С., Парфенцев И. В. Магнитометрические феррозондовые градиентометры для поиска взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2009. № 1. С. 16–29.
4. Миловзоров Д. Г., Ясоев В. Х. Математическое моделирование градиентометрических преобразователей

с феррозондовыми датчиками // Автометрия. 2017. Т. 53. № 4. С. 95–103. DOI: 10.15372/AUT20170411

5. Крапивский Е. И., Любчик А. Н., Беликов А. А. Исследование магнитных полей трубопроводов градиентометром с целью контроля их технического состояния // Материалы V Международной научной школы молодых учёных и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых», Москва, 11–14 ноября 2008. М.: УРАН ИПКОН РАН, 2008. С. 350–353.

6. Дубов А. А. Способ определения предельного состояния металла в зонах КН по градиенту магнитного поля рассеяния // Материалы II Международной конференции «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла», Москва, 26–28 февраля 2001. М.: Энергодиагностика, 2001. С. 51–64.

7. Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А. Комплексная магнитометрическая аппаратура для исследования сверхглубоких и разведочных скважин. Екатеринбург: УрО РАН, 2012. 120 с.

8. Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А., Миронова Н. К., Голиков Ю. В. Комплексный прибор рудного каротажа ПРК-4203 // Радиотехника. 2016. № 7. С. 144–152.

9. Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А. Аппаратурно-программный комплекс для непрерывной инклинометрии нефтяных и газовых скважин // Практика приборостроения. 2003. № 1. С. 17–21.

10. Миловзоров Д. Г., Логинова Т. М. Градиентометрические преобразователи с феррозондовыми датчиками // Материалы IX Международной научно-технической конференции «Измерение, контроль, информатизация». Барнаул, 3–4 июня 2009. Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И. И. Ползунова, 2009. С. 75–76.

11. Milovzorov G. V., Milovzorov D. G., Yasoveyev V. Kh., Redkina T. A., *Italian Science Review*, 2014, no. 18 (9), pp. 53–60.

12. Редькина Т. А., Миловзоров Д. Г., Садрутдинов Р. Р. О погрешностях градиентометров с биеlementными феррозондовыми датчиками // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 132–135.

13. Редькина Т. А., Миловзоров Д. Г., Мельников В. П. О построении градиентометров с биеlementными феррозондовыми датчиками // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Инновации в науке, технике и технологиях», Ижевск, 28–30 апреля 2014. Ижевск: Изд-во УдГУ, 2014. С. 218–219.

14. Астраханцев Ю. Г., Шерендо Т. А., Нехорошков В. Л., Шулина В. В., Потапов А. П. Использование нанокристаллических и аморфных сплавов в скважинных феррозондовых магнитометрах. Структура и свойства нанокристаллических материалов / Сборник научных трудов РАН. Уральское отделение. Екатеринбург: УрО РАН, 1999. 401 с.

15. Белоглазова Н. А. Программно-методические приёмы повышения точности инклинометрических и магнитных измерений // Практика приборостроения. 2003. № 2. С. 68–71.

16. Звежинский С. С., Парфенцев И. В. Метод магнитометрического обнаружения взрывоопасных предметов // Спецтехника и связь. 2008. № 2. С. 8–17.

17. Khurana K., Kepko L., Kivelson M. G., *Geophysical Monograph Series*, Washington DC, 1998, pp. 311–316. DOI: 10.1029/GM103p0311

18. Астраханцев Ю. Г., Белоглазова Н. А. Высочоточная градуировка феррозондовых магнитометров с использованием инклинометрических столов среднего класса точности // Приборы и системы разведочной геофизики: Метрология в геофизике. 2006. Т. 17. № 3. С. 60–62.

References

1. *Instruktsiya po magnitorazvedke (nazemnaya magnitnaya s'emka, aehromagnitnaya s'emka, gidromagnitnaya s'emka)*, Leningrad, Nedra Publ., 1981, 263 p. (in Russian).

2. Logachev A. A., Zakharov V. P., *Magnitorazvedka. Izd. 5-e, pererab. i dop.*, Leningrad, Nedra Publ., 1979, 351 p. (in Russian).

3. Zvezhinskii S. S., Parfentsev I. V., *Spetstekhnika i svyaz'*, 2009, no. 1, pp. 16–29 (in Russian).

4. Milovzorov D. G., Yasoveev V. K., *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 388–394. DOI: 10.3103/S8756699017040112

5. Krapivskii E. I., Lyubchik A. N., Belikov A. A., *Problemy osvoeniya nedr v 21 veke glazami molodykh*, Proceedings of 5th International school of young scientists and specialists, Moscow, November 11–14, 2008. Moscow, Institute for Integrated Subsoil Development Problems RAS, 2008, pp. 350–353.

6. Dubov A. A., *Diagnostika oborudovaniya i konstruksii s ispol'zovaniem magnitnoi pamyati metalla*, Proceedings of 2nd International conference, Moscow, February 26–28, 2001. Moscow, Energodiagnostika, 2001, pp. 51–64 (in Russian).

7. Astrakhtantsev Yu. G., Beloglazova N. A., *Kompleksnaya magnetometricheskaya apparatura dlya issledovaniya sverkhglubokikh i razvedochnykh skvazhin: monografiya*, Ekaterinburg: Ural Branch of RAS Publ., 2012, 120 p. (in Russian).

8. Astrakhtantsev Yu. G., Beloglazova N. A., *Radiotekhnika*, 2016, no. 7, pp. 144–152 (in Russian).

9. Astrakhtantsev Yu. G., Beloglazova N. A., *Praktika priborostroeniya*, 2003, no. 1, pp. 17–21 (in Russian).

10. Milovzorov D. G., Loginova T. M., *Izmerenie, kontrol', informatizatsiya*, Proceedings of 9th International Scientific and Practical conference, Barnaul, June 3–4, 2009. Barnaul, Altai State Technical University named after I. I. Polzunova, 2009, pp. 75–76 (in Russian).

11. Milovzorov G. V., Milovzorov D. G., Yasoveyev V. Kh., Redkina T. A., *Italian Science Review*, 2014, no. 18 (9), pp. 53–60.

12. Redkina T. A., Milovzorov D. G., Sadrutdinov R. R., *Bulletin of the Izhevsk State Technical University*, 2014, no. 3, pp. 132–135 (in Russian).

13. Redkina T. A., Milovzorov D. G., Melnikov V. P., *Innovatsii v nauke, tekhnike i tekhnologiyakh*, Collection of reports AI-Russian Scientific and Practical Conference, Izhevsk, April 28–30, 2014. Izhevsk, Udmurt State University, 2014, pp. 218–219 (in Russian).

14. Astrakhtantsev Yu. G., Sherendo T. A., Nekhoroshkov V. L., Shulina V. V., Potapov A. P., *Ispol'zovanie nanokristallicheskiykh i amorfnykh splavov v skvazhinnykh ferrozondovykh magnetometrach: Collection of scientific papers*, Ekaterinburg, Ural Branch of RAS Publ., 1999, pp. 383–390 (in Russian).

15. Beloglazova N. A., *Praktika priborostroeniya*, 2003, no. 2, pp. 68–71 (in Russian).

16. Zvezhinskii S. S., Parfentsev I. V., *Spetstekhnika i svyaz'*, 2008, no. 2, pp. 8–17 (in Russian).

17. Khurana K., Kepko L., Kivelson M. G., *Geophysical Monograph Series*, Washington DC, 1998, pp. 311–316. DOI: 10.1029/GM103p0311

18. Astrakhtantsev Yu. G., Beloglazova N. A., *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki: Metrologiya v geofizike*, 2006, vol. 17, no. 3, pp. 60–62 (in Russian).

Дата поступления: 10.06.2019.

Дата принятия: 09.12.2019.

Improving the measurement accuracy of magnetometer algorithmic correction of its instrumental errors

Yury G. Astrakhtantsev, Nadezhda A. Beloglazova

The Institute of Geophysics named after Y. P. Bulashevich Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russian Federation, e-mail: skvgeoph@mail.ru, bna408@mail.ru

In many applications of the magnetic method it is advantageous to have information about the geomagnetic field strength and its gradients. The direct measurement of gradients does not depend on geomagnetic variations or normal field values. Special equipment is required for this purpose. The results of the development and construction of a three-component magnetometer-gradiometer are presented. The device is designed to measure on the earth's surface the absolute values of the three components of the geomagnetic field vector and the corresponding three components of the gradient. Installation of additional measuring sensors in the device – accelerometers, allows you to calculate the orientation of these vectors in space. The device of a magnetometer-gradiometer is described, its functional scheme and operating principle are presented. A set of instrumental errors that occur in the manufacture of three-axis systems of ferrosondes and accelerometers for measuring the components of the geomagnetic field strength and determining the orientation of the device is considered. The paper presents a method for determining instrumental errors and algorithmic correction of information signals coming from measuring sensors to significantly improve the accuracy of measurements. Examples of field tests of the device are given. The presented magnetometer-gradiometer can be used for accurate localization of previously identified ore bodies and determining the details of their structure.

Key words: magnetometer-gradiometer, gradient of the geomagnetic field, magneto-probing equipment, algorithmic correction, ferroprobe sensors.

Способ обновления голосовых образцов в Единой биометрической системе в режиме реального времени

В. В. Савченко¹, А. В. Савченко²

¹Нижегородский государственный лингвистический университет,
Нижний Новгород, Российская Федерация,
e-mail: vvsavchenko@yandex.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Нижний Новгород, Российская Федерация,
e-mail: avsavchenko@hse.ru

Статья написана в развитие идей из предыдущей работы авторов [5]. Рассмотрена задача автоматизированного контроля качества голосовых образцов, зарегистрированных и хранящихся в Единой биометрической системе России. Предложено решение проблемы своевременного обновления собранных образцов, так как с течением времени они утрачивают свои потребительские качества. Исследован новый показатель акустического качества голосовых образцов в информационной метрике Кульбака–Лейблера и предложен метод его измерений в моменты обращения пользователей в систему с запросами на обслуживание. Показан пример практической реализации предложенного метода в режиме реального времени. С применением авторского программного обеспечения проведён натурный эксперимент, получены количественные оценки периода обновления голосовых образцов, даны рекомендации по их практическому применению. Полученные результаты можно использовать при разработке новых и модернизации существующих систем и технологий автоматизированного контроля качества и адаптивного обновления образцов биометрических персональных данных.

Ключевые слова: акустика речи, акустические измерения, речевой сигнал, биометрия, единая биометрическая система, голосовой образец, голосовая идентификация, голосовая верификация.

Введение. Единая биометрическая система (ЕБС) – это общенациональная цифровая платформа (URL: <https://bio.rt.ru>), созданная в 2018 г. по инициативе Банка России и Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (далее – Минкомсвязи России) в целях удалённой (дистанционной) идентификации граждан. Оператором ЕБС назначен Ростелеком. Мощным драйвером для запуска и наполнения ЕБС послужила принятая Правительством страны национальная программа «Цифровая экономика Российской Федерации» (URL: <https://digital.gov.ru/ru/activity/directions/858/>). В соответствии с заявленными целями данной программы и общемировым трендом в перспективе ЕБС должна проникнуть практически во все сферы национальной экономики: от здравоохранения и образования до системы государственных on-line услуг [1–3]. Однако на первом этапе приоритет был отдан банковской сфере, так как использование ЕБС позволит банкам оказывать услуги населению дистанционно, в том числе, по телефонному запросу, что должно резко увеличить банковские обороты [4]. Специально для банков Ростелекомом создано мобильное приложение «Биометрия». Как результат, с июля 2018 г. граждане России через все крупные банки страны получили возможность зарегистрировать в ЕБС биометрические данные в бимодальном варианте: фотография лица и запись голоса. В настоящее время

в сборе биометрических персональных данных (БПД) участвуют около 200 российских банков. Однако далеко не все проблемы в данном направлении успешно решены [5].

Одна из наиболее актуальных проблем – необходимость регулярных обновлений собранных образцов БПД [6, 7]. Особенно остро она возникает при записи голосовых образцов [8–10]. Вследствие феномена вариативности речевого сигнала на звуковом (фонетическом) уровне его восприятия любой голосовой образец с течением времени неизбежно стареет и постепенно утрачивает потребительские качества [11, 12]. Поэтому в п. 17 приложения 1 к приказу Минкомсвязи России от 25 июня 2018 г. № 321 «Об утверждении порядка обработки, включая сбор и хранение, параметров биометрических персональных данных в целях идентификации, порядка размещения и обновления биометрических персональных данных в Единой биометрической системе, а также требований к информационным технологиям и техническим средствам, предназначенным для обработки биометрических персональных данных в целях проведения идентификации» установлено жёсткое требование. Согласно этому требованию БПД применимы для идентификации не более трёх лет с момента сбора, а по истечении указанного срока их использование не допускается. Однако возникает закономерный вопрос: насколько обоснован установленный срок относительно массы голосовых образцов?

Отметим, что при строгом следовании данному требованию проблема обновления голосовых образцов будет непрерывно обостряться, причём, в геометрической прогрессии – по мере увеличения объёма клиентской базы данных в составе ЕБС.

Напротив, проблему можно сильно ослабить, если учесть, что скорость старения каждого отдельного голосового образца зависит от голосовых особенностей субъекта [7, 12]. У разных людей она разная. И эта разница, как будет экспериментально показано далее, может составлять и год, и два, и более. А это означает значительный ресурс для повышения точности идентификации граждан и, одновременно, экономии средств, направляемых Ростелекомом на обслуживание ЕБС. Однако для его реализации на практике требуется адаптивный подход к проблеме обновления голосовых образцов, когда очередной момент перезаписи образца обусловлен лишь фактом нарушения требований к предельно допустимой степени соответствия его акустических свойств характеристикам и свойствам фонетической базы данных (ФБД) соответствующего гражданина. Технология обновлений такого рода отнюдь не исключается авторами упомянутого выше приказа Минкомсвязи России, в п. 14 приложения 2 которого сказано, что обновление БПД осуществляется по инициативе самого гражданина. В свою очередь, адаптивный подход требует соответствующего инструментария для проведения измерений качества голосовых образцов в режиме on-line, т. е. в моменты обращений клиентов в банки с очередными запросами на обслуживание [13]. Задача в данном случае усложняется условиями малых выборок наблюдений, поскольку длительности и сигнала запроса клиента, и сигнала записи его голосовых образцов не превышают на практике нескольких секунд [5, 14, 15]. Поэтому актуальность темы проведённого авторами настоящей статьи исследования очевидна.

Цель исследования – выработка научно обоснованных рекомендаций по организации системы обновлений голосовых образцов в адаптивном варианте, т. е. в расчёте на голосовые особенности субъектов записи этих образцов. Объектом эксперимента служит ФБД контрольного диктора, содержащая звуковые файлы шести русских гласных фонем и охватывающая период с 2012 по 2019 гг. с интервалом между записями полгода–год. Предметом проведённого авторами исследования является новый в информационной метрике Кульбака–Лейблера [16] показатель качества голосовых образцов и новый метод его измерения в режиме реального времени или близком к нему режиме – с задержкой результата на время, не превышающее длительности сигнала запроса клиента. При проведении исследования задействован оригинальный математический аппарат, созданный в рамках принадлежащей авторам информационной теории восприятия речи [17–19]. При постановке и проведении эксперимента было применено специальное авторское программное обеспечение [20].

Постановка задачи. Под звуковой или фонетической вариативностью речевого сигнала $x_k(t)$, содержащего очередное, k -е обращение клиента (диктора) в банк, специалисты

понимают неконтролируемые изменения акустических характеристик элементарных составляющих сигнала: минимальных звуковых единиц (МЗЕ) типа фонем и их аллофонов предельно малой длительности $\tau=10\ldots30$ мс. Отметим, что однофонемные (одноимённые) реализации r -й МЗЕ в векторном обозначении $\mathbf{x}_{k,r,j}$ конечной размерности $n=F\tau$, где F – частота временной дискретизации речевого сигнала $x_k(t)$, $j \leq J_{k,r}$ – номер реализации, а $J_{k,r}$ – объём выборки, группируются в сознании человека в единый фонетический образ или кластер $X_{k,r} = \{\mathbf{x}_{k,r,j}\}$ вокруг своего центра $\mathbf{x}_{k,r}^*$ – эталонной метки r -й МЗЕ, иначе речь утратила бы своё назначение как средства коммуникации [17]. Здесь $r \leq R$ – номер МЗЕ в ФБД рассматриваемого диктора; R – количество МЗЕ, используемых при обработке речевого сигнала $x_k(t)$. В компактном, вокализованном варианте ФБД имеем $R=6$ – по числу русских гласных фонем как наиболее содержательных в теоретико-информационном смысле [19–21].

В информационной теории восприятия речи понятие ФБД определяется через R -многообразие $X_k \triangleq \{\mathbf{x}_{k,r}^*\}$ информационных эталонов МЗЕ $\mathbf{x}_{k,r}^*$ данного диктора (символом $\triangleq$ обозначено равенство по определению). При этом под информационным эталоном r -й МЗЕ понимают реализацию $\mathbf{x}_{k,r}^* \in X_{k,r}$ в пределах r -го фонетического кластера $X_{k,r} \triangleq \{\mathbf{x}_{k,r,j}\}$, если она характеризуется минимальной средней величиной

$$\rho_{k,r}^* \triangleq J_{k,r}^{-1} \sum_{j=1}^{J_{k,r}} \rho_{k,r}(\mathbf{x}_{k,r,j}) \quad (1)$$

информационного рассогласования $\rho_{k,r}(\mathbf{x}_{k,r,j})$ по Кульбаку–Лейблеру относительно всех других реализаций данной МЗЕ.

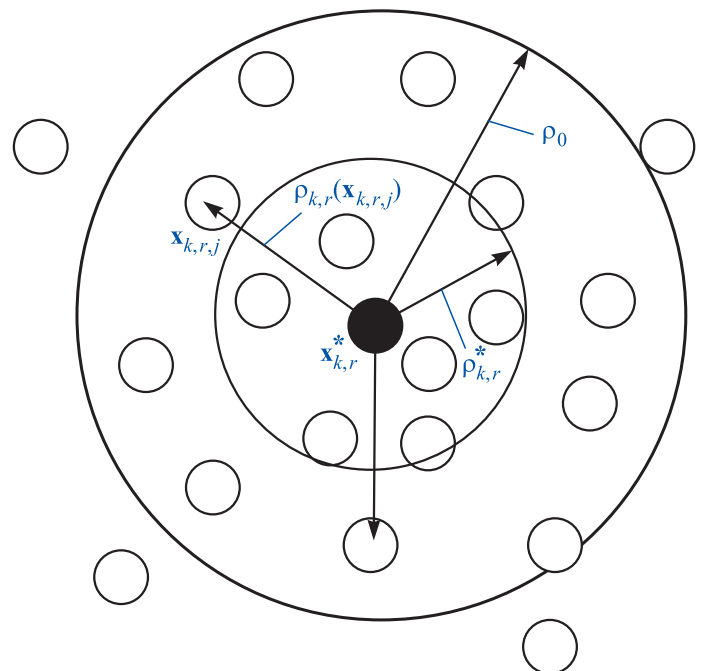


Рис. 1. Кластерная модель r -й минимальной звуковой единицы

Fig. 1. Cluster model of the r -th minimal sound unit

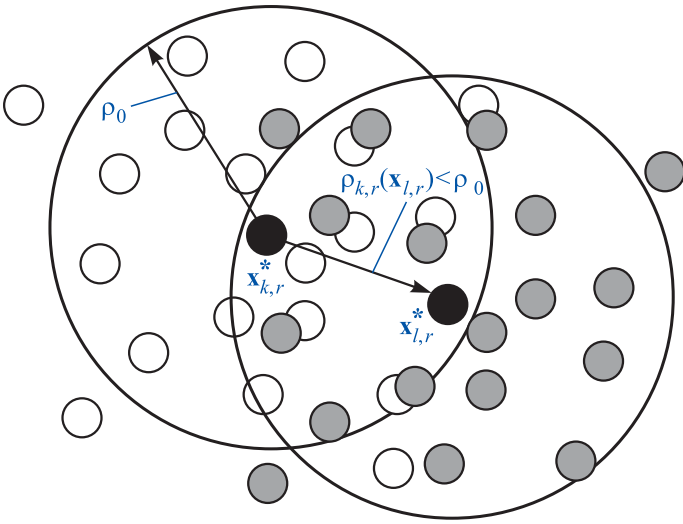


Рис. 2. Кластеры реализаций r -й минимальной звуковой единицы в рамках k -го и l -го (соответственно белые и серые круги) голосовых запросов диктора

Fig. 2. Clusters of implementations of the r -th minimal sound unit within the framework of the k and l (respectively white and gray circles) voice announcer requests

На рис. 1 представлена геометрическая интерпретация r -го фонетического кластера $X_{k,r}$ по результатам обновления ФБД на k -м шаге и перезаписи голосовых образцов. Здесь светлыми кружками обозначены различные реализации r -й МЗЕ на интервале действия k -го голосового запроса диктора $x_k(t)$, а чёрным кружком – r -й информационный эталон. Внешняя окружность с центром в точке $x_{k,r}^*$ и радиусом $\rho_0 = (2, \dots, 3)\rho_{k,r}^*$ разделяет множество реализаций $\{x_{k,r,j}\}$ на две неравные группы [18]. Близкие по тонкой структуре к эталону $x_{k,r}^*$ реализации не выходят за границы данной окружности. Это показатель их высокого акустического качества [19]. Против, недостаточно чётко проговоренные диктором, маргинальные реализации МЗЕ расположены за пределами окружности. Из сказанного вытекает следующий критерий качества голосовых образцов: МЗЕ диктора $x_{k,r,j}$ в пределах его очередного, l -го голосового запроса на обслуживание, где $l = k+1, k+2, \dots$, не должны выходить за ρ_0 -окрестности эталонов $x_{k,r}^*$ в составе ФБД последней обновлённой версии X_k , где ρ_0 – пороговый уровень допустимых информационных рассогласований на фонетическом уровне восприятия речи. Раскроем этот критерий в явном виде через показатель качества голосовых образцов.

Информационный показатель качества. Выделим из наблюдаемого сигнала $x_l(t)$ конечной длительности T_l последовательность J_l сегментов $x_{l,j}(t)$, $j=1, J_l$, одинаковой длительности $\tau \ll T_l$ (* – символ номера МЗЕ, который по условиям задачи идентификации заранее не известен), сопоставим их с эталонами сигналов МЗЕ $\{x_{k,r,j}(t)\}$ из обновлённой ФБД контрольного диктора для всех $r \leq R$. Это могут быть, например, шесть гласных фонем, которые легко выделяются из речевого сигнала $x_l(t)$ с помощью типового

амплитудного селектора [5]. Каждый такой сегмент определим через соответствующий фрейм данных $x_{l,j}$ конечной размерности n . Предположим, что речевой фрейм $x_{l,j}$ из l -го голосового запроса $x_l(t)$ предварительно ассоциирован наблюдателем с определённой МЗЕ $x_{k,r}^*$ из текущей ФБД пользователя ЕБС. Используем стандартную вычислительную процедуру, основанную на принципе минимума информационного рассогласования

$$r = \text{Arg min}_{s \leq R} (\rho_{k,s}(x_{l,j})) \quad (2)$$

применительно к множеству информационных эталонов $\{x_{k,r}^*\}$, которые обновлены на предыдущем, k -м шаге обращений пользователя с запросами на обслуживание [18, 21].

В пределах установленного r -го фонетического кластера $X_{k,r}$ сформулируем требования наблюдателя к качеству текущего j -го сегмента данных $x_{k,r,j}$ по принципу допустимого информационного рассогласования общего вида [5]:

$$\rho_{k,r}(x_{l,r,j}) \leq \rho_0. \quad (3)$$

Пороговая величина ρ_0 в правой части выражения (3) определяет уровень значимости решений, принимаемых наблюдателем согласно правилам (2), (3) [22]:

$$\alpha(\rho_0) \triangleq P\{\rho_{k,r}(x_{l,r,j}) > \rho_0 | x_{l,j} \in X_{k,r}\} = \alpha_0. \quad (4)$$

Чем меньше порог ρ_0 , тем выше достигаемый уровень значимости α_0 .

С течением времени речь банковского клиента меняет звуковой строй, соответственно изменяется и ФБД пользователя: $X_{l,r} \neq X_{k,r}$ – при каждом его очередном, т. е. l -м обращении в банк. Поэтому на l -м шаге ($l > k$) будем иметь неравенство общего вида $x_{l,r}^* \neq x_{k,r}^*$. Это неравенство проиллюстрировано диаграммой на рис. 2, на котором в условном виде представлены два одноимённых фонетических кластера $X_{k,r}$, $X_{l,r}$. Для наглядности элементы второго кластера выделены серым фоном. Кластеры пересекаются между собой, но друг с другом не совпадают. Это явный признак старения голосовых образцов. Допустимым пределом указанного старения служит условие вида [17]:

$$\rho_{k,r}(x_{l,r}^*) \leq \rho_0 = (2, \dots, 3)\rho_{k,r}^*, \quad r = \overline{1, R}. \quad (5)$$

При его нарушении пользователь получает от ЕБС уведомление с рекомендацией перезаписи голосового образца. Отметим, такая рекомендация точно встраивается в п. 14 приложения 2 к приказу Минкомсвязи России от 25 июня 2018 г. № 321. В данном случае объективным показателем качества r -й МЗЕ диктора может служить информационное рассогласование

$$\rho_{k,l}(r) \triangleq \rho_{k,r}(x_{l,r}^*) \quad (6)$$

между её информационными эталонами $x_{k,r}^*$, $x_{l,r}^*$ из двух разных голосовых запросов на обслуживание зарегистрированного в ЕБС банковского клиента.

Обновление ФБД состоит, в таком случае, в обновлении набора информационных эталонов $x_{k,r}^*$ для всех $r \leq R$. Данная процедура хорошо изучена в теории, её методика апробирована на практике [17–20]. В работе [21] показано, что благодаря высокой скорости сходимости статистики выборочного среднего информационного рассогласования (1), заведомо достаточным в пределах k -го обращения диктора $x_k(t)$ считается объём классифицированной выборки $J_{k,r} = 10 \dots 20$. Следовательно, речевой сигнал от данного диктора $x_k(t)$ длительностью $T_k = (2 \dots 3)R \times J_{k,r} \times \tau = (1,2 \dots 1,8)R$ с можно считать достаточным для формирования ФБД X_k . В частности, в расчёте на использование шести гласных фонем русского языка получаем $T_k = 8 \dots 10$ с, что хорошо согласуется с возможностями современных методов автоматической обработки речи [3, 15].

С другой стороны, голосовые образцы пользователя ЕБС – это форма отображения всех эталонов МЗЕ $x_{k,r}^*$ или их части [5]. В таком случае вслед за ФБД X_k содержание голосовых образцов должно зависеть от номера k обращения диктора в банк, т. е. от текущего времени. В противном случае неизбежно возникает проблема старения голосовых образцов [8]. Периодическое обновление ФБД и перезапись голосовых образцов банковских клиентов – способ минимизировать указанную проблему. Наиболее существенный результат достигается при адаптивном варианте измерений [12, 13]. Рассмотрим его применительно к информационному показателю качества (6).

Описание метода измерений. Следуя логике требования (5) к парциальным (пофонемным) показателям качества голосовых образцов, определим согласно выражению (6) интегральный показатель качества по формуле

$$P(k, l) \triangleq \sum_{r=1}^R H(p_{k,l}(r) - p_0), \quad (7)$$

где $H(\cdot)$ – функция Хевисайда или функция единичного скачка.

В идеальном случае, когда для всех $r \leq R$ выполняется соотношение (5) и $H(\cdot) = 0$, показатель (7) равен нулю, и клиент не получает от ЕБС рекомендаций по обновлению его голосовых образцов. В условиях недопустимого старения голосовых образцов, когда хотя бы один из парциальных показателей из

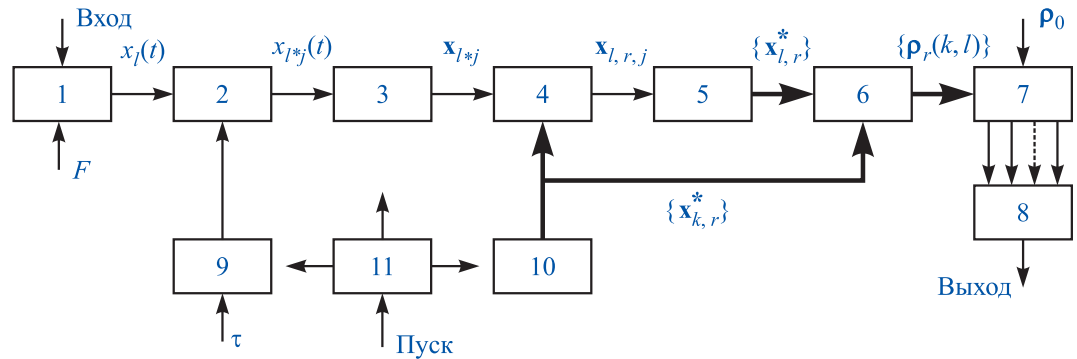


Рис. 3. Структурная схема устройства измерений показателя качества голосовых образцов: 1 – аналого-цифровой преобразователь речевого сигнала $x_l(t)$; 2 – формирователь последовательности фреймов данных; 3 – амплитудный селектор гласных МЗЕ; 4 – блок автоматического распознавания фонем; 5 – блок формирования ФБД по голосовому запросу клиента; 6 – блок измерений парциальных показателей качества голосовых образцов (6); 7 – блок вычислений функции Хевисайда с порогом срабатывания p_0 ; 8 – выходной сумматор; 9 – генератор тактовых импульсов с периодом повторения τ ; 10 – блок памяти ФБД; 11 – блок управления и синхронизации

Fig. 3. The block diagram of the device for measuring the indicator of quality voice pattern: 1 – analog-to-digital voice signal $x_l(t)$ converter; 2 – shaper data frames; 3 – amplitude vowel selector MSU; 4 – block automatic recognition of phonemes; 5 – PD (phonetic database) generation unit at the customer's voice request; 6 – block measurements of partial indicators of quality voice pattern (6); 7 – block of calculations of the Heaviside function with a threshold p_0 ; 8 – output adder; 9 – clock generator with a repetition period τ ; 10 – PD memory block; 11 – control and synchronization unit

формулы (6) нарушает требование (5), интегральный показатель (7) устанавливается отличным от нуля. И чем больше указанное отличие в интервале значений $1-R$, тем острее необходимость обновления голосовых образцов данного клиента. В любом случае неравенство $P(k, l) > 0$ служит сигналом к скорой отбраковке голосовых образцов как непригодных для дальнейшего использования. Выражения (5)–(7) определяют новый метод измерений показателя качества голосовых образцов в расчёте на эффект его старения.

Структурная схема устройства, реализующего предложенный метод, представлена на рис. 3. Устройство состоит из последовательно соединённых аналого-цифрового преобразователя 1 сигнала $x_l(t)$ с частотой отсчётов F , формирователя последовательности фреймов данных 2, амплитудного селектора 3 гласных звуков речи диктора и нескольких блоков: автоматического распознавания фонем 4; формирования 5 ФБД X_k по текущему голосовому запросу клиента; измерений 6 парциальных показателей качества сигнала $x_l(t)$; вычислений функции Хевисайда 7 с пороговым уровнем p_0 . Кроме того, в состав устройства входят выходной сумматор 8, генератор тактовых импульсов 9 для регулировки длительности фреймов τ , блок памяти 10 для хранения ранее обновлённой ФБД X_k и блок управления и синхронизации 11. Работа устройства в динамике состоит в последовательной обработке речевого сигнала от диктора согласно адаптивному алгоритму (1)–(7).

В предложенном методе решение по идентификации пользователя ЕБС формируется независимо от решения по обновлению его голосовых образцов. А их корреляция друг

с другом зависит от применённого в ЕБС алгоритма идентификации, с одной стороны, и от установленного в формуле (5) порога ρ_0 , с другой. Величина ρ_0 определяет требования наблюдателя к качеству голосовых образцов. При понижении порога требования повышаются, и наоборот. С другой стороны, при повышении требований согласно выражению (4) повышается уровень значимости α_0 , а вслед за ним увеличивается и частота перезаписей голосовых образцов пользователей. Следовательно, при выборе порога ρ_0 надо достигать компромисса. Необходимую ясность в этот актуальнейший для практики вопрос должны внести результаты экспериментального исследования, проведённого с помощью авторского программного обеспечения Phoneme Training.

Таблица 1

Матрица оценок информационного рассогласования гласных МЗЕ контрольного диктора

s	r					
	1	2	3	4	5	6
1	0,05	41,82	14,97	10,24	10,57	3,60
2	29,60	0,17	17,47	18,20	1,41	7,74
3	30,60	67,23	0,08	2,73	29,73	10,06
4	258,01	40,86	6,98	0,12	48,46	58,51
5	11,03	1,83	8,84	9,23	0,06	1,68
6	2,58	7,79	12,32	9,75	2,45	0,11
Фонемы	«а»	«и»	«о»	«у»	«ы»	«э»

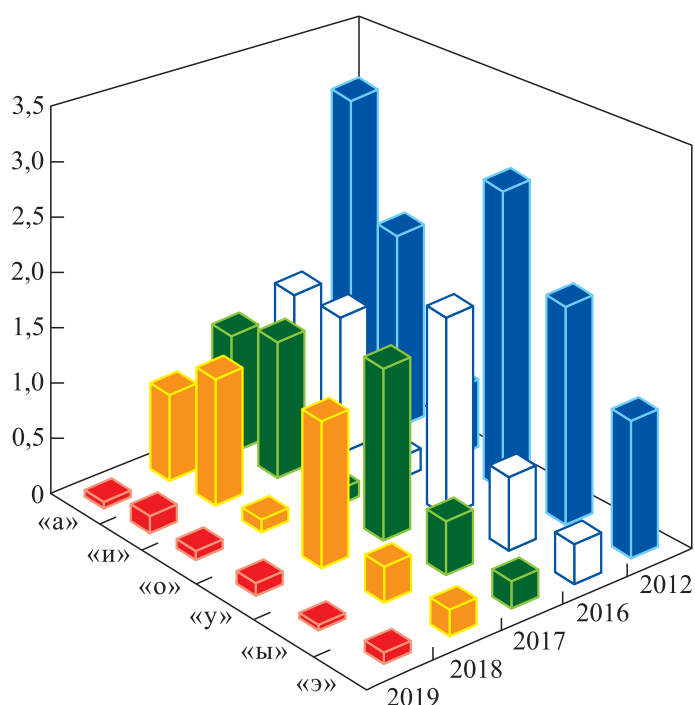


Рис. 4. Гистограмма парциальных показателей $\rho_{l,l-m}(r)$ качества речи контрольного диктора

Fig. 4. The histogram of the partial indicators $\rho_{l,l-m}(r)$ of quality of the speech of the control speaker

Программа и результаты эксперимента. Объектом исследования служили аудиозаписи сигналов $x_{l,r}(t)$ шести гласных фонем ($R=6$): «а», «и», «о», «у», «ы» и «э» в произнесении контрольного диктора – одного из авторов настоящей статьи – за период 2012–2019 гг. Частота их дискретизации $F=8$ кГц была согласована в эксперименте с полосой пропускания стандартного телефонного канала связи, хотя программный комплекс Phoneme Training допускает несложную модификацию для обработки речевых сигналов в широком (8000–22050 Гц) диапазоне частот. Аудиозаписи сигналов сохранены на сайте программы в режиме открытого доступа [20]. Длительность $T_{l,r}=2...3$ с аудиозаписи сигналов изначально предполагала автоматическое членение каждого сигнала $x_{l,r}(t)$ на последовательность коротких ($\tau=30$ мс) фреймов данных $\mathbf{x}_{k,r,j}$ с их частичным (10 мс) перекрытием во времени.

Предметом исследования авторов настоящей статьи являлся показатель качества (6) в сопоставлении со средним уровнем (1) внутрифонемного информационного рассогласования по Кульбаку–Лейблеру. В программе оба показателя вычисляли статистически, т. е. усреднением множества пофреймовых (выборочных) оценок информационного рассогласования в частотной области:

$$\rho_{l,r}(\mathbf{x}_{l-m,s,j}) = (2F)^{-1} \times \int_{-F/2}^{F/2} \left(\frac{G_{l-m,s,j}(f)}{G_{l,r}^*(f)} - \ln \frac{G_{l-m,s,j}(f)}{G_{l,r}^*(f)} - 1 \right) df, \quad j = \overline{1, J_r}, \quad (8)$$

где $G_{l-m,s,j}(f)$, $G_{l,r}^*(f)$ – спектральная плотность мощности соответственно фрейма данных $\mathbf{x}_{l-m,s,j}$ и информационного эталона $\mathbf{x}_{l,r}^*$ в функции линейной частоты f [Гц]; $m=0, 1, \dots, 6$ – интервальный сдвиг во времени между двумя моментами записи голоса диктора.

Объёмы множеств $J_{l,r}$ составляли в каждом случае не менее 200–300 образцов информационного рассогласования (8) по каждой из гласных фонем. Как следствие, погрешность

$$\delta_{l-m,r} = 1,65 / \sqrt{J_{l-m,r}}$$

результатов проведённых измерений с доверительной вероятностью 0,9 не вышла за пределы 10 % [19, 22]. При этом использовались авторегрессионные оценки спектральной плотности мощности 20-го порядка методом максимума энтропии [23]. Все вычисления выполняли на современном персональном компьютере. Полученные результаты представлены в табл. 1, 2 и на рис. 4.

В табл. 1 показана (6×6)-матрица статистических оценок информационного рассогласования на l -м шаге

$$\rho_{l,r}(\mathbf{x}_{l,s}^*) \triangleq J_{l,s}^{-1} \sum_{j=1}^{J_{l,s}} \rho_{l,r}(\mathbf{x}_{l,s,j}), \quad \forall r, s \leq R.$$

При расчёте учитывали данные ФБД контрольного диктора X_l по состоянию на 30 ноября 2019 г.

Отметим, что данная матрица имеет принципиально асимметричный вид, следующий из свойства направленности информационного рассогласования. Причём различия в её элементах, расположенных симметрично относительно главной диагонали, достигают в ряде случаев нескольких десятков раз. На главной диагонали для сравнения приведены статистические оценки среднего радиуса $\rho_{l,r}^*$ (выделены серым фоном) в пределах каждого r -го фонетического кластера (см. рис. 1). Это парциальные показатели качества голоса диктора (6) при равенстве $l=k$. Во всех случаях уровень внутрифонемной вариативности находится глубоко под уровнем межфонемных различий МЗЕ данного диктора, что гарантирует практически безошибочную идентификацию его личности в ЕБС, причём в пренебрежении эффектом старения голосовых образцов.

В развитие полученных результатов в табл. 2 построена матрица статистических оценок информационного рассогласования

$$\rho_{l,r}(\mathbf{x}_{l-1,s}^*) \triangleq J_{l-1,s}^{-1} \sum_{j=1}^{J_{l-1,s}} \rho_{l,r}(\mathbf{x}_{l-1,s,j}), \quad \forall r, s \leq R,$$

на множестве эталонов гласных фонем от контрольного диктора, полученных со сдвигом в полгода между моментами их записи: в июне и ноябре 2019 г. Здесь на главной диагонали (при $s=r$) расположены элементы $\rho_{l,r}(\mathbf{x}_{l-1,r}^*)$. По существу, это обобщение выражения (6) на случай произвольной пары фонем с номерами r, s .

Отметим, что структуры обеих матриц имеют подобный вид. Это неудивительно, если учесть относительно короткий отрезок времени между моментами записи речевого сигнала во втором случае от одного и того же контрольного диктора. И все же различия между матрицами существуют. Эти различия затрагивают не только (и не столько) элементы на главных диагоналях (во втором случае они существенно больше), но и иные элементы (отмечены серым фоном), которые оказывают прямое влияние на точность голосовой идентификации диктора согласно критерию (5). Указанный факт свидетельствует о возникновении определённых проблем при применении голосовых образцов даже полугодовой давности.

Сделанный вывод подтверждается результатами дальнейшего эксперимента, проведённого по предыдущей схеме измерений парциального показателя качества (6) при перезаписи голосовых образцов в моменты $k=l-1, l-2$ и т. д. с интервалом в один год. Полученные результаты сведены в гистограмму на рис. 4, откуда следует, что поведение показателей (6) качества в динамике сильно различается для разных фонем. Часть из них – фонемы «о» и «э» – не нуждается в обновлении в течение трёх-четырёх лет. Другая часть, напротив, требует обновления не реже одного раза в год. Какая именно часть – зависит от конкретного диктора. И этот факт никак нельзя игнорировать, если рассчитывать на массовое использование ЕБС в целях голосовой идентификации граждан. Поэтому главный вывод авторов по результатам проведённого исследования сводится

к следующему: выбор периода обновления каждого отдельного образца БПД должен учитывать индивидуальные особенности субъекта его записи и в общем случае может варьироваться в весьма широких пределах: от одного года и более. При этом обновление голосовых образцов в ЕБС может быть частичным, затрагивающим конечную группу фонем в расчёте на конкретного пользователя и режим реального времени, и оно не сводится каждый раз к полной их перезаписи.

Обсуждение полученных результатов. В большинстве известных работ по исследованию акустической вариативности устной речи доминирует эвристический подход, основанный на разнообразных мерах различий речевых сигналов от разных дикторов [10–12]. И хотя полученные в этих работах результаты интерпретируются в терминах статистических оценок и выводов, в отсутствие вероятностной модели они принципиально носят детерминистский, т. е. единичный характер и поэтому не выходят за рамки конкретных текстов и дикторов. В настоящей статье предложен теоретико-информационный показатель качества речевого сигнала в метрике Кульбака–Лейблера. Его математическая формулировка (6) отталкивается от принципа минимума информационного рассогласования сигналов (2). Как следствие, сфера применения предложенных показателей и метода его измерений распространяется на разные сигналы, разных дикторов и разные условия речевого производства. Поэтому полученные авторами настоящей статьи результаты и сделанные ими выводы имеют очевидное фундаментальное значение.

Отличительной особенностью информационного показателя (6) является высокая скорость сходимости его статистических оценок в частотной области (8) в расчёте на преодоление проблемы малых выборок наблюдений. Однако определяющее значение в данном случае имеет известное из работ [19, 24] свойство направленного информационного рассогласования по Кульбаку–Лейблеру: сочетаться наилучшим образом со средней экспертной (аудиторской) оценкой MOS (от англ. Mean Opinion Score) речевого сигнала, принятой Международным союзом электросвязи МСЭ-Т в качестве рекомендации

Таблица 2

Матрица оценок информационного рассогласования гласных МЗЕ контрольного диктора со сдвигом по времени записи на полгода

s	r					
	1	2	3	4	5	6
1	0,46	12,51	7,65	5,34	3,30	0,994
2	8,87	0,53	12,98	14,54	3,77	3,37
3	24,73	35,79	0,24	1,72	13,37	6,49
4	121,17	14,33	2,09	0,69	15,44	22,72
5	7,37	0,44	11,18	13,46	2,82	2,46
6	2,66	3,03	8,88	8,22	1,12	0,31
Фонемы	«а»	«и»	«о»	«у»	«ы»	«э»

P.1120 (URL: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?id=13176&lang=en>).

Заключение. Проведённое исследование позволило теоретически и экспериментально обосновать адаптивный способ обновления голосовых образцов в режиме реального времени. Для осуществления данного способа разработан и апробирован весь необходимый инструментарий, а именно: информационный показатель качества речевого сигнала (6) и новый метод его измерений (1)–(5) в моменты обращений клиентов в банки с голосовыми запросами на очередное обслуживание. Существенным обоснованием ценности результатов проведённого исследования является согласованность выводов и рекомендаций с текстом приказа Минкомсвязи России от 25 июня 2018 года № 321, в котором предусмотрена процедура обновления голосовых образцов не в жёстко заданные сроки, а по желанию пользователей ЕБС.

Статья рассчитана на широкий круг исследователей и специалистов-практиков, организующих работу банков и иных уполномоченных организаций по автоматизированному сбору и контролю качества зарегистрированных в ЕБС клиентских образцов БПД.

Статья подготовлена в рамках «Программы фундаментальных исследований» Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».

Список литературы

1. Singh M., Singh R., Ross A., *Information Fusion*, 2019, vol. 52, no. 12, pp. 187–205. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.12.003
2. Barra S., Castiglione A., Narducci F., De Marsico M., Nappi M., *Image and Vision Computing*, 2018, vol. 76, no. 8, pp. 27–37. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.001
3. Chowdhury F., Selouani S. A., O'Shaughnessy D., In book: *Signal and Image Processing for Biometrics*, John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 131–148. DOI: 10.1002/9781118561911.ch7
4. Smallman M., *Biometric Technology Today*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 5–7. DOI: 10.1016/S0969-4765(17)30013-9
5. Савченко В. В., Савченко А. В. Метод измерений показателя акустического качества аудиозаписей, подготовленных для регистрации и обработки в Единой биометрической системе // *Измерительная техника*, 2019. № 12. С. 46–52. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-12-40-46
6. Kekre H. B., Bharadi V. A., 2009 *IEEE International Advance Computing Conference*, Patiala, India. Pub. IEEE, 2009, pp. 535–540. DOI: 10.1109/IADCC.2009.4809068
7. Anzar S. M., Amala K., Rajendran R., *Computers & Electrical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 10–25. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2015.12.003
8. Matveev Y., *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, vol. 8113, pp. 345–353. DOI: 10.1007/978-3-319-01931-4_46
9. Sholokhov A., Kinnunen T., Vestman V., Lee K. A., *Computer Speech & Language*, 2019. vol. 59, no. 10, pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.csl.2019.101024
10. Hansen J., Bøfil H., *Speech Communication*, 2018. vol. 101, no. 5, pp. 94–108. DOI: 10.1016/j.specom.2018.05.004
11. Heald Sh., Klos S., Nusbaum H., In book *Neurobiology of Language*, USA, Academic Press, 2015, pp. 195–208. DOI: 10.1016/B978-0-12-407794-2.00017-1
12. Чучупал В. Я. Неявная модель вариативности произношения для автоматического распознавания речи // *Машинное обучение и анализ данных*. 2016. Т. 2. № 4. С. 370–377. DOI: 10.21469/22233792.2.4.01
13. Pat. US 8 775178 B2. United States. Int. Cl.7 G10L 15/063. *Updating a voice template* / Yukari M., Masami N., International Business Machines Corp., No. 2008-275807, Oct. 27, 2008 – No. US 2010/0106501 A1, Apr. 29, 2010. Pub. Apr. 9, 2013, 11 p.
14. Savchenko V. V., *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 373–379. DOI: 10.1007/s11141-015-9611-4
15. Протокол натурных испытаний. URL: https://sites.google.com/site/frompldcreators/protocol_3-1.pdf (дата обращения: 02.11.2019).
16. Kullback S., *Information Theory and Statistics*, N. Y., Dover Publications, 1997, 432 p., available at: <https://www.amazon.com/Information-Theory-Statistics-Dover-Mathematics/dp/0486696847>
17. Савченко В. В., Савченко Л. В. Метод измерений показателя разборчивости речевого сигнала в информационной метрике Кульбака–Лейблера // *Измерительная техника*. 2019. № 9. С. 59–64. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-9-59-64
18. Savchenko V. V., *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 590–596. DOI: 10.1134/S1064226919060093
19. Савченко В. В. Метод измерений показателя акустического качества речи на основе теоретико-информационного подхода // *Измерительная техника*. 2018. № 1. С. 60–64. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-1-60-64
20. Программно-аппаратный комплекс Phoneme Training. URL: <https://sites.google.com/site/frompldcreators/produkty-1/phonemetraining> (дата обращения: 02.11.2019).
21. Savchenko V. V., Savchenko A. V., *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 430–435. DOI: 10.1134/S1064226916040112
22. Muller P. H., Neumann P., Storm R., *Tafeln der mathematischen Statistik*, Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1973, 279 p. DOI: 10.1002/bimj.19740160816
23. Savchenko V. V., Savchenko A. V., *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 276–286. DOI: 10.3103/S0735272719050042
24. Benesty J., Sondhi M. M., Huang Y., *Linear prediction: In Springer handbook of speech processing*. Part B, N.Y., Springer, 2008, pp. 111–121. DOI: 10.1007/978-3-540-49127-9_7

References

1. Singh M., Singh R., Ross A., *Information Fusion*, 2019, vol. 52, no. 12, pp. 187–205. DOI: 10.1016/j.inffus.2018.12.003
2. Barra S., Castiglione A., Narducci F., De Marsico M., Nappi M., *Image and Vision Computing*, 2018, vol. 76, no. 8, pp. 27–37. DOI: 10.1016/j.imavis.2018.05.001

3. Chowdhury F., Selouani S. A., O'Shaughnessy D., In book: *Signal and Image Processing for Biometrics*, John Wiley & Sons, Inc., 2013, pp. 131–148. DOI: 10.1002/9781118561911.ch7
4. Smallman M., *Biometric Technology Today*, 2017, vol. 2017, no. 1, pp. 5–7. DOI: 10.1016/S0969-4765(17)30013-9
5. Savchenko V. V., Savchenko A. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 12, pp. 46–52. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-12-40-46
6. Kekre H. B., Bharadi V. A., *2009 IEEE International Advance Computing Conference*, Patiala, India, Pub. IEEE, 2009, pp. 535–540. DOI: 10.1109/IADCC.2009.4809068
7. Anzar S. M., Amala K., Rajendran R., *Computers & Electrical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 2, pp. 10–25. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2015.12.003
8. Matveev Y., *Lecture Notes in Computer Science*, 2013, vol. 8113, pp. 345–353. DOI: 10.1007/978-3-319-01931-4_46
9. Sholokhov A., Kinnunen T., Vestman V., Lee K. A., *Computer Speech & Language*, 2019, vol. 59, no. 10, pp. 101–110. DOI: 10.1016/j.csl.2019.101024
10. Hansen J., Bořil H., *Speech Communication*, 2018, vol. 101, no. 5, pp. 94–108. DOI: 10.1016/j.specom.2018.05.004
11. Heald Sh., Klos S. Nusbaum H., In book *Neurobiology of Language*, USA, Academic Press, 2015, pp. 195–208. DOI: 10.1016/B978-0-12-407794-2.00017-1
12. Chuchupal V. Ya., *Mashinnoe obuchenie i analiz dannykh*, 2016, vol. 2, no. 4, pp. 370–377 (in Russian). DOI: 10.21469/22233792.2.4.01
13. Pat. US 8 775178 B2. United States. Int. Cl. 7 G10L 15/063. *Updating a voice template* / Yukari M., Masami N., International Business Machines Corp., No. 2008-275807, Oct. 27, 2008 – No. US 2010/0106501 A1, Apr. 29, 2010. Pub. Apr. 9, 2013, 11 p.
14. Savchenko V. V., *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 373–379. DOI: 10.1007/s11141-015-9611-4
15. Protokol naturnykh ispytaniy, available at: https://sites.google.com/site/frompldcreators/protocol_3-1.pdf (accessed: 02.11.2019) (in Russian).
16. Kullback S., *Information Theory and Statistics*, N.Y., Dover Publications, 1997, 432 p., available at: <https://www.amazon.com/Information-Theory-Statistics-Dover-Mathematics/dp/0486696847>
17. Savchenko V. V., Savchenko L. V., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, no. 9, pp. 59–64. DOI: 10.1007/s11018-019-01702-1
18. Savchenko V. V., *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 590–596. DOI: 10.1134/S1064226919060093
19. Savchenko V. V., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 79–84. DOI: 10.1007/s11018-018-1391-8
20. Programmno-apparatnyi kompleks Phoneme Training, available at: <https://sites.google.com/site/frompldcreators/produkty-1/phonemetraining> (accessed: 02.11.2019) (in Russian).
21. Savchenko V. V., Savchenko A. V., *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2016, vol. 61, no. 4, pp. 430–435. DOI: 10.1134/S1064226916040112
22. Muller P. H., Neumann P., Storm R., *Tafeln der mathematischen Statistik*, Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1973, 279 p. DOI: 10.1002/bimj.19740160816
23. Savchenko V. V., Savchenko A. V., *Radioelectronics and Communications Systems*, 2019, vol. 62, no. 5, pp. 276–286. DOI: 10.3103/S0735272719050042
24. Benesty J., Sondhi M. M., Huang Y., *Linear prediction*: In Springer handbook of speech processing. Pt. B, N. Y., Springer, 2008, pp. 111–121. DOI: 10.1007/978-3-540-49127-9_7

Дата поступления: 24.12.2019.

Дата принятия: 14.01.2020.

Method of real-time updating for voice templates in the Unified Biometric System

Vladimir V. Savchenko¹, Andrey V. Savchenko²

¹Nizhniy Novgorod State Linguistic University, Nizhniy Novgorod, Russian Federation,
e-mail: vvsavchenko@yandex.ru

²National Research University Higher School of Economics, Nizhniy Novgorod, Russian Federation,
e-mail: avsavchenko@hse.ru

The article was written in the development of ideas from a previous work of the authors [5]. The task of automated quality control of voice templates, which were registered and stored in the Unified Biometric System is considered. A solution to the problem of timely updating of the collected templates is proposed, since over time they lose their consumer qualities. A new indicator of the acoustic quality of voice templates in the Kullback–Leibler information metric was investigated and a method for measuring it at the moments when users contacting the system with service requests was proposed. An example of the practical implementation of the proposed method is shown. Using the author's software, a full-scale experiment was conducted, quantitative estimates of the period for updating voice templates were obtained, and recommendations were given on their practical application. The results can be used to develop new and modernize existing systems and technologies for automated quality control and updating of biometric personal data templates.

Key words: speech acoustics, acoustic measurements, speech signal, biometric, unified biometric system, voice template, voice identification, voice verification.

Высокоточная система измерений температуры для магнитно-резонансной томографии

Д. С. Семенов¹, В. А. Яцеев², Е. С. Ахмад¹, Ю. А. Васильев¹, К. А. Сергунова¹, А. В. Петрайкин¹

¹Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения города Москвы, Москва, Российская Федерация, e-mail: d.semenov@nrcmr.ru, e.ahmad@nrcmr.ru, dr.vasilev@me.com, sergunova@nrcmr.ru, alexeypetraikin@gmail.com

²Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: yatseev@gmail.com

Для определения соответствия имплантируемого медицинского изделия требованиям безопасности в магнитно-резонансной томографии необходима экспериментальная оценка нагрева этого изделия за время исследования. Применение традиционных методов, таких как термопарные измерения или радиационная термометрия, затруднительно в условиях кабинета магнитно-резонансной томографии. В работе предложена спектрометрическая система для измерения температуры в условиях кабинета магнитно-резонансной томографии. Разработанная система обладает чувствительностью 0,01 °С и погрешностью 0,1 % в диапазоне 10–50 °С. Используемые в системе датчики температуры представляют собой интерферометры Фабри–Перо. Описана конструкция датчиков и способ их калибровки. Апробация системы проведена при определении нагрева двух пассивных имплантатов за время исследования в магнитно-резонансном томографе с индукцией магнитного поля 1,5 Тл. Продemonстрировано соответствие разработанной системы принятым в магнитно-резонансной томографии рекомендациям по оценке нагрева имплантируемых медицинских изделий. Получено значение температуры, сопоставимое со значением, найденным при испытаниях данного имплантата по методике ASTM F 2182. Представленную измерительную систему можно использовать при оценке магнитно-резонансной совместимости имплантируемых медицинских изделий, при разработке протоколов сканирования пациентов с металлоконструкциями, а также для подтверждения или уточнения математических моделей теплопереноса.

Ключевые слова: магнитно-резонансная томография, нагрев в электромагнитном поле, измерение температуры, оптоволоконные системы, датчик Фабри–Перо, широкополосная интерферометрия, имплантируемые медицинские изделия.

Введение. Магнитно-резонансная томография (МРТ) – один из широко распространённых методов медицинской визуализации. В отличие от других рентгенологических исследований данный метод не предполагает лучевой нагрузки на пациента. Однако постоянные и переменные электромагнитные поля приводят к возникновению определённых факторов риска, одним из которых является тепловой отклик тканей. Первые данные о нагреве тканей во время магнитно-резонансного исследования относятся к 80-м годам XX в., однако проведённые эксперименты касались преимущественно локальных изменений температуры [1]. Значительный вклад в описание воздействия электромагнитных полей МРТ внёс Frank G. Shellock [2–4]. Важным с точки зрения обеспечения безопасности фактором является нагрев имплантируемых медицинских изделий вследствие возникновения в них токов, которые появляются в результате взаимодействия с переменными магнитными полями. International Electrotechnical Commission (IEC) разработала требования по безопасности МРТ, действующие на сегодняшний день в России как ГОСТ МЭК 60601-2-33

«Изделия медицинские электрические. Часть 2-33. Частные требования безопасности с учётом основных функциональных характеристик к медицинскому диагностическому оборудованию, работающему на основе магнитного резонанса» и ограничивающие максимальный локальный нагрев тканей организма в процессе исследования. American College of Radiology (ACR), в свою очередь, предложила экспериментальную методику оценки нагрева имплантатов в МРТ, описанную в стандарте ASTM F 2182 [5]. Эта методика активно применяется на практике для подтверждения теоретических исследований [6]. Кроме того, результат испытаний учитывается при определении типа магнитно-резонансной совместимости имплантата: безопасен, небезопасен или совместим при определённых условиях [7]. Отдельная задача такого исследования – измерение температуры в условиях МРТ, к которым относятся:

воздействие постоянного магнитного поля, индукция которого достигает 1,5–3,0, а иногда и 7,0 Тл;

влияние переменных градиентных и радиочастотных полей, воздействующих на фантом из геля, который имитирует электрофизические свойства тканей организма [5].

Диапазон регистрируемых значений накладывает ограничение на точность измерительной системы, так как допустимым считается изменение температуры на 1 °C за 6 мин исследований согласно ГОСТ МЭК 60601-2-33. Для некоторых ферромагнитных объектов скорость нарастания не превышает 0,05 °C/мин [8], а при возникновении антенного эффекта нагрев может достигать 60 °C [9].

Цель данной работы – решение задачи высокоточной регистрации нагрева имплантируемых медицинских изделий в условиях кабинета МРТ. Использование термопарных измерений или радиационной термометрии невозможно в связи с чувствительностью к электрическим помехам, отсутствию данных о коэффициентах излучения, влиянию постороннего излучения и др. Поэтому оптимальным представляется применение оптических систем, в которых показания термочувствительного элемента считывается световым пучком, не подверженным внешним воздействиям. В то же время, световой пучок имеет ряд характерных признаков, таких как длина волны, направление распространения и т. д., что позволяет выделить его относительно фонового сигнала и помех.

Обоснование разработки системы. Для измерения температуры в основном используют следующие волоконно-оптические датчики: флуориметрический [10, 11], на волоконных брэгговских решётках [12, 13] и интерферометре Фабри–Перо [6, 14–16]. Наиболее распространёнными волоконно-оптическими датчиками температуры и деформации являются сенсоры на основе брэгговских решёток [12, 13, 17]. Для таких измерений с помощью излучения лазеров ультрафиолетового диапазона в волокне создаются периодические микро-структуры [18, 19], которые отражают свет на определённой длине волны, зависящей от периода решётки и показателя преломления световода. При изменении внешней температуры происходит изменение параметров брэгговской решётки, что приводит к спектральному смещению максимума пика отражения решётки. Наряду с достоинствами таких датчиков, главные из которых – широкий диапазон измерений и возможность мультиплексирования, т. е. размещения множества датчиков последовательно на одном волокне, существенным недостатком оказывается требовательность к качеству спектрометра, входящего в состав приёмного блока – интеррогатора. Как правило, разрешающая способность по температуре таких датчиков не превышает 0,1–0,5 °C в зависимости от применённой системы опроса.

Наиболее чувствительными датчиками являются датчики на основе интерферометров, в частности, интерферометра Фабри–Перо, принцип действия которого использовался в данной работе. В настоящий момент существует несколько производителей медицинских датчиков на интерферометре Фабри–Перо: компании Fiso Techn. Inc. (Канада), Opsens (Канада), RJC Enterprises LLC (США) и др. В промышленном производстве датчиков они используют процессы травления волокна для образования в нём микро-структур, таких как полости или диафрагмы. Данный подход позволяет реализовать

промышленное производство в масштабах нескольких десятков тысяч единиц продукции в год. Датчики обладают малыми размерами (0,2 мкм), сравнимыми с диаметром самого волокна, что является преимуществом для применения этих датчиков при введении в тело живого организма [14]. Как и в случае датчиков на брэгговских решётках, данный способ изготовления сенсоров ограничивает чувствительность используемого метода.

Конструкция датчика. Разработанный авторами настоящей статьи датчик показан на рис. 1 и представляет собой следующую конструкцию: два отрезка оптического волокна 1 заключены в чувствительный капилляр 3 и жёстко закреплены с ним точечной сваркой 5. Интерферометр образован перпендикулярными сколами отрезков волокна. При увеличении температуры происходит удлинение стеклянного капилляра и волокон внутри него, но поскольку коэффициент расширения стекла значительно выше коэффициента расширения кварцевого волокна, то торцы волокон начинают расходиться в стороны. По сравнению с датчиками на основе решёток Брэгга, измерение температуры происходит не за счёт температурного расширения кварцевого волокна, а зависит от расширения стеклянного капилляра, у которого существует температурный коэффициент расширения, на порядок превышающий соответствующий для плавленого кварца. Поэтому на порядок возрастает и чувствительность к температуре. Коэффициент усиления чувствительности, по сравнению с датчиками на решётках Брэгга, можно приблизительно оценить по формуле

$$K = \frac{\alpha_{\text{ст}}}{\alpha_{\text{кв}}} \frac{L_{\text{Бр}}}{L_{\text{Ф-П}}},$$

где $\alpha_{\text{ст}}$, $\alpha_{\text{кв}}$ – температурные коэффициенты расширения стекла и кварца соответственно; $L_{\text{Бр}}$ – длина решётки Брэгга; $L_{\text{Ф-П}}$ – длина датчика Фабри–Перо.

При характерной длине решётки Брэгга несколько миллиметров и длине датчиков Фабри–Перо десять миллиметров

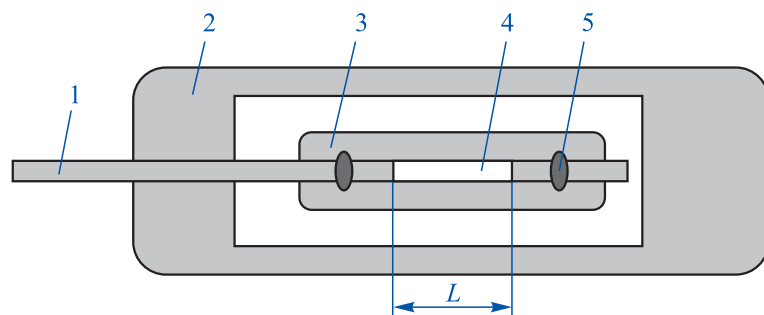


Рис. 1. Структурная схема датчика:

1 – оптическое волокно; 2 – защитный капилляр; 3 – чувствительный капилляр; 4 – оптический зазор; 5 – точки сварки

Fig. 1. Sensor design:

1 – optical fiber; 2 – protective capillary; 3 – sensitive capillary; 4 – optical gap; 5 – welding point

и более можно получить увеличение чувствительности в десятки и сотни раз.

Изготовление датчика. Одна из проблем, которая решалась авторами при изготовлении датчиков – это способ закрепления волокна в капилляре. Поскольку диапазон перемещения волокна относительно капилляра при измерениях температуры составляет от нескольких нанометров до нескольких микрометров, то фиксация волокна в капилляре должна обеспечивать соответствующую точность. Были протестированы различные клеи, в том числе, на основе цианидов, полиуретанов, эпоксидных смол и пр. Однако они не смогли обеспечить длительное бездрейфовое фиксирование поверхностей при воздействии температур

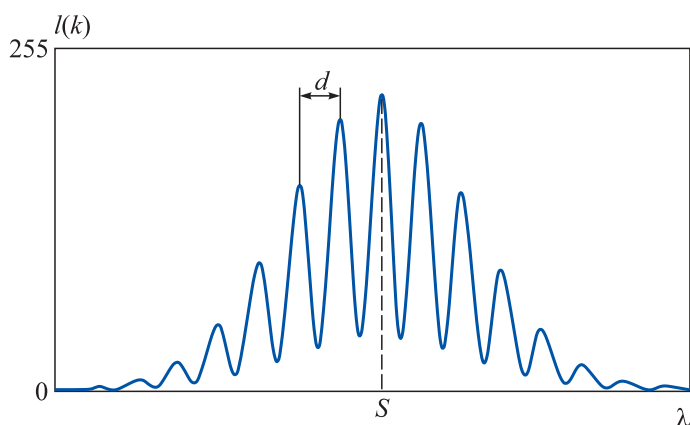


Рис. 2. Спектр излучения, отражённого от интерферометра Фабри–Перо

Fig. 2. Spectrum of radiation reflected from a Fabry–Perot interferometer

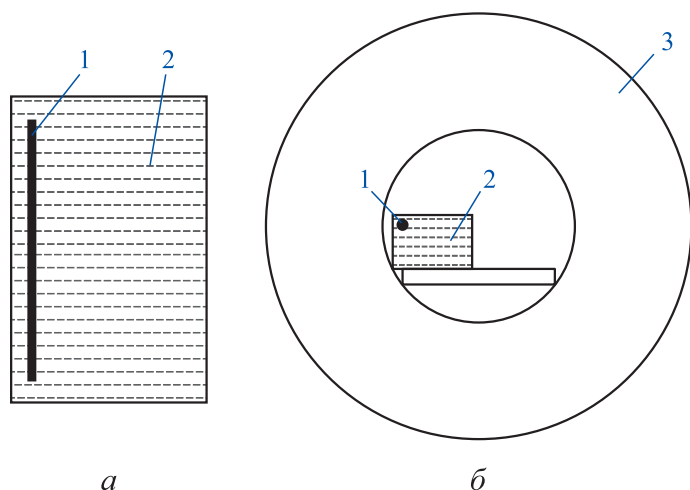


Рис. 3. Фантом (а) и его расположение (б) в томографе:
1 – имплантат; 2 – фантом с гелем; 3 – сверхпроводящий магнит

Fig. 3. Phantom (a) and its configuration (b) in tomograph:
1 – implant; 2 – gel phantom; 3 – superconducting magnet

рабочего диапазона 10–50 °С. Поэтому авторы воспользовались методом вплавления волокна в стеклянный капилляр с помощью точечной дуговой сварки. Температура сварки превышала 1000 °С и была подобрана таким образом, чтобы не повредить волокно при плавлении и обеспечить надёжность закрепления стеклянного капилляра и кварцевого волокна. При этом перед приваркой торцы волокон фиксировали в капилляре на расстоянии 50 мкм. Для защиты от механических деформаций задействовали дополнительный стеклянный капилляр 2, запаянный с одной стороны (см. рис. 1). Полученная в результате разработки конструкция обладает достаточной прочностью, что необходимо при размещении датчика в вязком гелевом фантоме.

Принцип работы системы измерения температуры.

Измерительная система состоит из двенадцатиканального оптического измерительного блока со спектрометром на дифракционной решётке. Указанный оптический блок подключён к интеррогатору оптических датчиков температуры. Датчики представляют собой интерферометры Фабри–Перо, образованные плоскими торцами оптических волокон, расположенных на расстоянии L порядка десятка микрометров (см. рис. 1).

Способ измерения основан на принципе широкополосной интерферометрии, согласно которому используется так называемый источник белого света: в данном случае – светодиоды с шириной спектра 40 нм, излучение от которых направляется в датчики. От датчиков излучение отражается обратно, при этом его спектр претерпевает изменения в зависимости от расстояния между сколами волокон – базой интерферометра. Далее отражённое от датчиков излучение направляется в интеррогатор, в котором спектрометр раскладывает свет по длинам волн и передаёт спектр излучения на светоприёмную матрицу. Пример спектра датчика приведён на рис. 2, где d – расстояние между пиками; S – длина волны, соответствующая наибольшему пику интерференционной картины.

Для повышения чувствительности метода измерений применили схему двухстадийного анализа сигнала: на первом этапе анализировали расстояние между пиками интерференционной картины в спектре и вычисляли предварительное значение L , затем оценивали положения пиков в спектре, по которому указанное значение можно определить с более высокой точностью. Данный способ позволяет увеличить чувствительность метода определения расстояния между отражающими поверхностями до точности в несколько нанометров и измерять температуру с чувствительностью до сотых долей градусов, обеспечивая возможность проведения измерений абсолютных значений.

Калибровка разработанной системы. Основной физической величиной, которую позволяет измерять датчик на интерферометре Фабри–Перо, является расстояние L между отражающими поверхностями, в рассматриваемом случае – сколами волокон. Чтобы получить в качестве выходного сигнала температуру, необходимо провести калибровку, т. е. установить зависимость температуры от

расстояний между сколами. Так как отклик системы линеен, то для нормировки достаточно осуществить калибровку при двух значениях рабочего диапазона: у верхней и нижней границ. Калибровка обеспечивается помещением датчиков в температурный жидкостный масляный термостат с встроенным эталонным датчиком температуры, точность которого 0,05 °C и выше.

Апробация измерительной системы.

Апробация системы проводилась при определении нагрева двух пассивных имплантатов за время магнитно-резонансного исследования. Схема эксперимента представлена на рис. 3. Прямоугольный фантом 2 в соответствии с рекомендациями [5] был заполнен гелем из гидроксипропилцеллюлозы. Расположение фантома и имплантата 1 относительно изоцентра томографа 3 выбирали в соответствии с картой удельного коэффициента поглощения (SAR) так, чтобы обеспечить максимальный нагрев. Положение имплантата относительно фантома показано на рис. 3, а. Температурные датчики были зафиксированы на поверхности имплантатов с помощью амагнитной ленты: для имплантата бедренного сустава на головке и окончании бедренного стержня, а для вытянутого ортопедического имплантата – на двух его концах. Блок управления измерительной системы находился в технической комнате кабинета МРТ за пределами клетки Фарадея.

Исследование проводили на томографе Hitachi Oval 1,5T с применением импульсной последовательности Turbo Spin Echo, $TR=260$ мс, $TE=6$ мс, Echo Train Length=16, Bandwidth=69 кГц, Flip Angle=90°, SAR=1,5 Вт/кг, длительность сканирования составила 15 мин.

Для термостатирования имплантаты и фантом поместили в процедурную за несколько часов до начала исследования. По результатам анализа данных эксперимента получены значения измерения температуры, представленные на рис. 4. Кроме того, в результате эксперимента определили амплитуды нагрева поверхности ортопедического имплантата, которая составила 4 °C за 15 мин, и имплантата тазобедренного сустава – 2,5 °C за 15 мин. В последнем случае данные совпали с представленным производителем значением.

Закключение. Разработана высокоточная оптоволоконная система измерения температуры с чувствительностью 0,01 °C, совместимая с условиями магнитно-резонансной среды и принятыми методиками определения максимального нагрева имплантируемых медицинских изделий. Проведена апробация системы, показавшая её полное соответствие требованиям и позволившая получить равноценные оценкам производителя одного из имплантатов значения. Представленный измерительный комплекс может

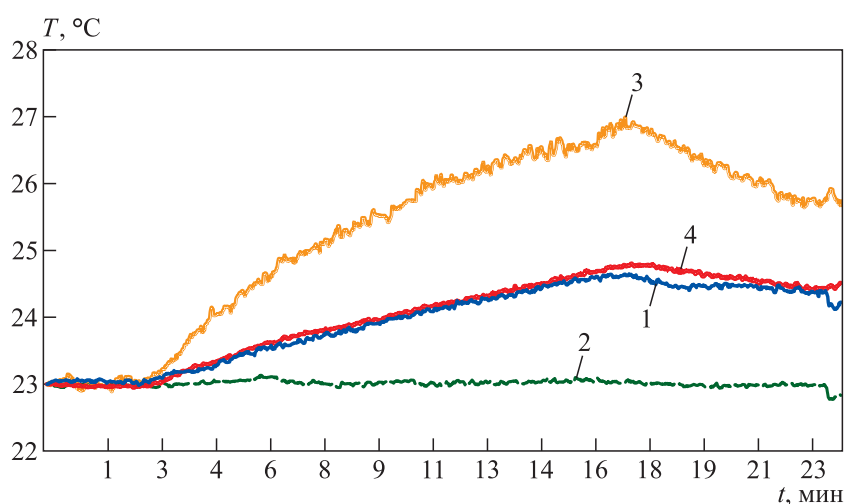


Рис. 4. Зависимость измеренной температуры T от времени t (время от начала исследования) для различных датчиков в процессе магнитно-резонансного исследования;

1 – окончание бедренного стержня; 2 – головка имплантата бедра; 3 – первый конец ортопедического имплантата; 4 – второй конец ортопедического имплантата

Fig. 4. A graph of the of sensor data on time dependence during the MR study:
1 – end of the femoral shaft; 2 – head of the femoral implant; 3 – first end of the orthopedic implant; 4 – second end of the orthopedic implant

быть использован не только для экспериментального определения нагрева металлоконструкций в МРТ, но и для идентификации, подтверждения или уточнения математических моделей теплопереноса, а также при разработке методик безопасного проведения магнитно-резонансных исследований пациентам с имплантатами и в демонстрационных целях.

Список литературы

1. Elder J. A., Cahill D. F., *Biological Effects of Radiofrequency Radiation*. Research Triangle Park N. C.: Health Effects Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, 1984, 250 p.
2. Shellock F. G., Schaefer D. J., Gordon C. J., *Magnetic Resonance in Medicine*, 1986, vol. 3, no. 4. pp. 644–647.
3. Shellock F. G., *Magnetic resonance quarterly*, 1989, vol. 5, no. 4. pp. 243–261.
4. Shellock F. G., *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2000, vol. 12, no. 1. pp. 30–36. DOI: 10.1002/1522-2586(200007)12:1<30::aid-jmri4>3.0.co;2-s
5. ASTM F 2182-11a standard test method for measurement of radio frequency induced heating on or near passive implants during magnetic resonance imaging. URL: <https://www.astm.org/Standards/F2182.htm> (дата обращения: 24.04.2018).
6. Feng D. X. McCauley J. P., Morgan-Curtis F. K., Salam R. A., Pennel D. R., *British Journal of Radiology*, 2015, vol. 88, no. 1056, 20150633. DOI: 10.1259/bjr.20150633

7. Сергунова К. А., Ахмад Е. С., Петряйкин А. В., Кивасев С. А., Семенов Д. С., Васильев Ю. А., Морозов С. П., Владимирский А. В., Низовцова Л. А. Безопасность проведения магнитно-резонансного исследования пациентам с имплантируемыми медицинскими изделиями // Бюллетень НЦССХ им. А. Н. Бакулева РАМН. 2019. Т. 20. № 4. С. 313–323. DOI: 10.24022/1810-0694-2019-20-4-313-323

8. Васильев Ю. А., Семенов Д. С., Яцеев В. А., Ахмад Е. С., Петряйкин А. В., Марусина М. Я., Курлаева Ю. Н. Экспериментальное исследование нагрева ферромагнитных объектов при проведении магнитно-резонансной томографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 173–179. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-173-179

9. Panych L. P., Madore B., *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2018, vol. 47, no. 1. pp. 28–43. DOI: 10.1002/jmri.25761

10. Armenean C., Perrin E., Armenean M., Beuf O., Pilleul F., Saint-Jalmes H., *Magnetic Resonance in Medicine*, 2004, no. 52, pp. 1200–1206. DOI: 10.1002/mrm.20246

11. Neufeld E., Kühn S., Szekely G., Kuster N., *Physics in Medicine and Biology*, 2009, vol. 54, no. 13. pp. 4151–4169. DOI: 10.1088/0031-9155/54/13/012

12. Butov O. V., Dianov E. M., Golant K. M., *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17. pp. 975–979. DOI: 10.1088/0957-0233/17/5/S06

13. Ramakrishnan M., Rajan G., Semenova Y., Farrell G., *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 1. pp. 99–126. DOI: 10.3390/s16010099

14. Королёв В. А., Потапов В. Т. Биомедицинские оптоволоконные датчики температуры и давления // Медицинская техника. 2012. Т. 272. № 2. С. 38–42.

15. Соколов А. Н., Яцеев В. А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // *LightWave Russ.* 2006. № 4. С. 44–46.

16. Зотов А. М., Короленко П. В., Яцеев В. А. Алгоритмы быстрой обработки сигналов волоконно-оптического интерферометра Фабри–Перо // Датчики и системы. 2018. № 4. С. 29–33.

17. Butov O. V., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Fedorov A. N., Shevtsov I. A., *Sensors*, 2019, 19(19), 4228. DOI: 10.3390/s19194228.17

18. Butov O. V., *Results in Physics*, 2019, vol. 15, 102542. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102542

19. Васильев С. А., Медведков О. И., Королёв И. Г. Волоконные решётки показателя преломления и их применение // Квантовая электроника. 2005. Т. 35. № 12. С. 1085–1103. DOI: 10.1070/QE2005v035n12ABEH013041

References

1. Elder J. A., Cahill D. F., *Biological Effects of Radiofrequency Radiation*. Research Triangle Park N. C.: Health Effects Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, 1984, 250 p.

2. Shellock F. G., Schaefer D. J., Gordon C. J., *Magnetic Resonance in Medicine*, 1986, vol. 3, no. 4, pp. 644–647.

3. Shellock F. G., *Magnetic resonance quarterly*, 1989, vol. 5, no. 4, pp. 243–261.

4. Shellock F. G., *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2000, vol. 12, no. 1, pp. 30–36. DOI: 10.1002/1522-2586(200007)12:1<30:aid-jmri4>3.0.co;2-s

5. ASTM F 2182-11a standard test method for measurement of radio frequency induced heating on or near passive implants during magnetic resonance imaging, available at: <https://www.astm.org/Standards/F2182.htm> (accessed: 24.04.2018).

6. Feng D. X., McCauley J. P., Morgan-Curtis F. K., Salam R. A., Pennel D. R., *British Journal of Radiology*, 2015, vol. 88, no. 1056, 20150633. DOI: 10.1259/bjr.20150633

7. Sergunova K. A., Akhmad E. S., Petraiikin A. V., Kivasev S. A., Semenov D. S., Vasilev Yu. A., Morozov S. P., Vladzimirsky A. V., Nizovtsova L. A., *The Bulletin of Bakoulev Center Cardiovascular Diseases*, 2019, vol. 20, no. 4, pp. 313–323. DOI: 10.24022/1810-0694-2019-20-4-313-323

8. Vasilev Yu. A., Semenov D. S., Yatseev V. A., Akhmad E. S., Petryakin A. V., Marusina M. Ya., Kurlaeva Yu. N., *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 173–179. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-173-179

9. Panych L. P., Madore B., *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2018, vol. 47, no. 1, pp. 28–43. DOI: 10.1002/jmri.25761

10. Armenean C., Perrin E., Armenean M., Beuf O., Pilleul F., Saint-Jalmes H., *Magnetic Resonance in Medicine*, 2004, no. 52, pp. 1200–1206. DOI: 10.1002/mrm.20246

11. Neufeld E., Kühn S., Szekely G., Kuster N., *Physics in Medicine and Biology*, 2009, vol. 54, no. 13, pp. 4151–4169. DOI: 10.1088/0031-9155/54/13/012

12. Butov O. V., Dianov E. M., Golant K. M., *Measurement Science and Technology*, 2006, vol. 17, pp. 975–979. DOI: 10.1088/0957-0233/17/5/S06

13. Ramakrishnan M., Rajan G., Semenova Y., Farrell G., *Sensors*, 2016, vol. 16, no. 1, pp. 99–126. DOI: 10.3390/s16010099

14. Korolyov V. A., Potapov V. T., *Biomedical Engineering*, 2012, vol. 46, no. 2, pp. 7–82.

15. Sokolov A. N., Yatseev V. A., *Light Wave Russ.*, 2006, no. 4, pp. 44–46 (in Russian).

16. Zotov A. M., Korolenko P. V., Yatseev V. A., *Sensors&Systems*, 2018, no. 4, pp. 29–33 (in Russian).

17. Butov O. V., Bazakutsa A. P., Chamorovskiy Y. K., Fedorov A. N., Shevtsov I. A., *Sensors*, 2019, 19(19), 4228. DOI: 10.3390/s19194228.17

18. Butov O. V., *Results in Physics*, 2019, vol. 15, 102542. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102542

19. Vasil'ev S. A., Medvedkov O. I., Korolev I. G., *Quantum Electronics*, 2005, vol. 35, no. 12, pp. 1085–1103. DOI: 10.1070/QE2005v035n12ABEH013041

Дата поступления: 25.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

Highly sensitive magnetic resonance compatible temperature measurement system

Dmitry S. Semenov¹, Ekaterina S. Akhmad¹, Vasily A. Yatseev², Yuriy A. Vasilev¹,
Kristina A. Sergunova¹, Alexey V. Petraikin¹

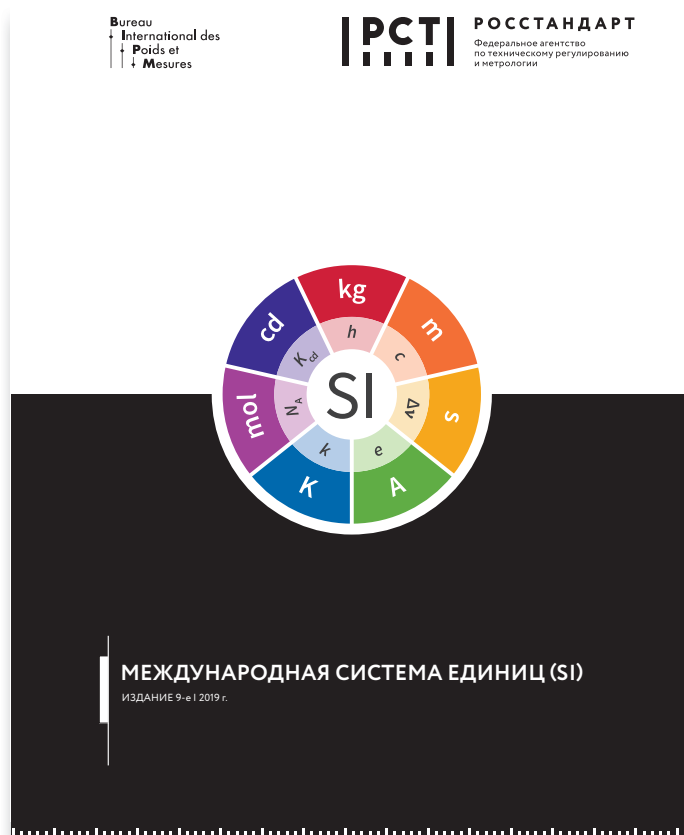
¹Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of Moscow Health Care Department, Moscow, Russian Federation, e-mail: d.semenov@npcmr.ru, e.ahmad@npcmr.ru, dr.vasilev@me.com, sergunova@npcmr.ru, alexeypetraikin@gmail.com

²Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (IRE) of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: yatseev@gmail.com

One of the steps in determining the compliance of an implantable medical device with the safety requirements in magnetic resonance imaging (MRI) is the experimental assessment of its heating over the course of the study. However, the application of traditional methods, such as thermocouple measurements or radiation thermometry, is difficult in connection with the conditions of high magnetic fields. A spectrometric system is proposed for measuring temperature in a magnetic resonance imaging cabinet with sensitivity of 0.01 °C and error of 0.1 % in the range of 10–50 °C. Temperature sensors are Fabry–Perot interferometers formed by flat ends of optical fibers located at a distance of about tens of micrometers. A design of the sensor and a calibration method are described. A design of the sensor and a calibration method are described. The system was tested in the process of two passive implants heating in 1,5 T MRI. As a result, compliance with the accepted recommendations for assessing the heating of implantable medical devices in MRI was demonstrated, and the temperature rise value was obtained that was comparable to the manufacturer's tests of this product according to ASTM F 2182. The presented measurement system can be used to assess the MR-compatibility of implantable medical devices, to develop scanning protocols for patients with metal structures, as well as to confirm or refine mathematical models of heat transfer.

Key words: magnetic resonance imaging, electromagnetic heating, temperature measurement, fiber optic systems, Fabry–Perot sensor, interferometry, implantable medical devices.

Издание «Международная система единиц SI» переведено на русский язык



Электронная версия по ссылке

https://www.vniims.ru/upload/docs/SI_final%20vniim.pdf

Этот документ был составлен после получения разрешения от МБМВ, который сохраняет полное авторское право, охраняемое на международном уровне. МБМВ не несёт никакой ответственности за актуальность, точность, полноту или качество информации и материалов, предлагаемых в любом переводе. Единственной официальной версией является оригинал документа, опубликованного МБМВ.

Издание подготовлено Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Над переводом работали: А.Б. Дятлев (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), Е.П. Зингер (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), Е.Ю. Корзинин (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), Е.И. Лунёва (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), Г.В. Битюкова (ФГУП «ВНИИМС»), Л.К. Исаев (ФГУП «ВНИИМС»), М.И. Калинин (ФГУП «ВНИИМС»).

Примечание по авторскому праву.

Брошюра SI распространяется в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе, при условии, что будет дана соответствующая ссылка на автора(ов) и источник произведения, включена ссылка на лицензию Creative Commons и дано указание на то, были ли внесены какие-либо изменения.

ВСЕМИРНЫЙ ДЕНЬ МЕТРОЛОГИИ

Измерения для глобальной торговли

РСТ

ВНИИМС



Bureau
International des
Poids et
Mesures



20 мая 2020

www.worldmetrologyday.org

© 2020 BIPM-OIML

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Продолжается подписка на журналы
«Измерительная техника» и «Метрология» на 2020 г.

АО «Агентство «Роспечать»

(подписка на полугодие или отдельные номера)

www.rosp.ru +7 (495) 921-25-26

«Измерительная техника» – индекс 70391

«Метрология» – индекс 79377

АО «Агентство подписки и розницы»

(по Объединённому каталогу «Пресса России»)

www.apr.ru +7 (495) 974-11-11

«Измерительная техника» – индекс 38168

«Метрология» – индекс 38169

ООО «Информнаука»

www.informnauka.com +7 (495) 787-38-73

ООО «УП «Урал-Пресс»

www.ural-press.ru +7 (499) 700-05-07

ФГУП «ВНИИМС»

www.vniims.ru +7 (495) 430-28-02

Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU

www.elibrary.ru +7 (495) 544-24-94

Электронно-библиотечная система РУКОНТ

www.rucont.ru +7 (495) 719-09-21

Адрес редакции:

119361 Москва, ул. Озёрная, 46, ФГУП «ВНИИМС»

Тел.: +7 (495) 781-48-70

E-mail: izmt@vniims.ru

www.izmt.ru