

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
РОССТАНДАРТ**



**Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Всероссийский научно-исследовательский институт  
метрологии им. Д.И. Менделеева»**

## **Конференция**

**«175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева  
и Национальной системе обеспечения единства  
измерений»**

# **СБОРНИК ТРУДОВ**

**Санкт-Петербург  
14-15 июня 2017 г.**

**УДК 006.9**  
**ББК 30.10**

**Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург.**

Конференция «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений». Сборник трудов.

**ISBN**

В сборнике собраны труды, которые были представлены на юбилейной конференции «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений».

*В 2017 году ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, отмечает юбилейную дату – 175 лет со дня своего основания. Наш институт был основан в 1842 году по указу российского императора Николая I, подписанному 16 (4) июня. Сейчас ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» является старейшим национальным метрологическим институтом в России и в мире и занимает лидирующее положение в нашей стране в области точных измерений. Важнейшая государственная задача, стоящая перед институтом, – обеспечение единства измерений в стране на международном уровне на основе использования государственных эталонов единиц физических величин, совершенствования существующих эталонов и создания новых путем проведения фундаментальных и прикладных научных исследований.*

*14-15 июня 2017 года состоялась международная научно-практическая конференция «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений». В конференции приняли участие ведущие метрологические организации России, Кореи, Франции, Германии, Великобритании, Беларуси, Украины, Японии и Китая.*

***Контакты ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»***

*Адрес: 190005, РФ, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19.*

*Телефон: +7 812 251-76-01.*

*Факс: +7 812 713-01-14.*

*E-mail: [info@vniim.ru](mailto:info@vniim.ru)*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
СЕКЦИЯ 01 «ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ»	5
СЕКЦИЯ 02 «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ»	56
СЕКЦИЯ 03 «ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ»	116
СЕКЦИЯ 04 «ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ»	148
СЕКЦИЯ 06 «ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ»	157
СЕКЦИЯ 07 «НОВЫЕ ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИИ В XXI ВЕКЕ»	231

## Секция № 01 «Теоретическая метрология»

Содержание	стр.
В.А. Грановский, <i>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»</i> Теоретическая метрология: проблемы и перспективы	6
Т.Н. Сирая, <i>АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»</i> Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели	8
А.Г. Чуновкина, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,</i> О выражении точности измерений и применении показателей точности	9
Н.Ю. Ефремова, <i>Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ)</i> Использование неопределенности измерений в прикладных задачах метрологии	10
В.Ш. Сулаберидзе, Т.П. Мишура, <i>СПбГУАП</i> Внутренние противоречия концепции неопределенности, затрудняющие ее преподавание в ВУЗе	11
Э.И. Цветков, Е.С. Сулоева, <i>СПбГЭТУ «ЛЭТИ»</i> Анализ параметров, определяющих достоверность результатов верификации средств измерений	12
А.С. Дойников, <i>ФГУП «ВНИИФТРИ»</i> Метрология в Большой Российской энциклопедии	13
И.П. Захаров, О.А.Боцюра, <i>Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ)</i> Оценивание расширенной неопределенности измерений при реализации байесовского подхода	24
Ф.Ф. Карпешин, Л.Ф. Витушкин, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> Два механизма возбуждения ядра лазером как пролог к созданию ядерно-оптических часов	25
А.А. Данилов, Д.В. Спутнова, <i>ФБУ «Пензенский ЦСМ»</i> Анализ моделей описания нестабильности средств измерений	34
В.И. Дворкин, <i>Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН</i> Компьютеризация лабораторий. Общее состояние и метрологические аспекты	35
Н.А. Бурмистрова <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> Алгоритм получения совместимых результатов измерений при анализе данных ключевых сличений	48

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВА

В.А. Грановский

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*

vgranovsky@eprib.ru; valgr39@mail.ru

В наименовании доклада нет слова «состояние», и прямая оценка состояния не входила в намерения автора. Однако косвенно состояние теоретической метрологии (ТМ) не может не быть затронуто, поскольку проблема понимается как вопрос, более или менее очевидный или осознанный, но не решаемый на регулярной основе. В этой связи ссылки на публикации следует рассматривать только как подтверждение того, что та или иная проблема осознана соответствующим специалистом, который инициирует ее решение или участвует в нем.

ТМ занимает центральное положение в триединой структуре метрологии (прикладная, теоретическая, законодательная). Поэтому, говоря о ТМ, нельзя не касаться прикладной и законодательной ветвей метрологии. Соответственно, доклад посвящен анализу проблем и перспективы развития ТМ, исходя из ее внутренней структуры, а также ее положения в структуре метрологии в целом. Здесь и далее имеется в виду общая теория метрологии, которая в новой России, очевидно, переживает период застоя. Можно предположить, что сферами развития теоретических исследований сейчас являются преимущественно области измерений, положение в которых автору известно недостаточно.

Причиной замедления (почти прекращения) общетеоретических метрологических исследований явилось не только резкое снижение доступных ресурсов, а также уменьшение количества метрологических институтов и сокращение их финансирования. К этой непосредственно действующей причине добавились отдаленные последствия принятого в 60-е годы решения (казавшегося тогда обоснованным) о создании ведомственных метрологических служб. До этой перестройки объектом заботы соответствующего метрологического института была область измерений целиком – от эталонных до рабочих (в пределе – цеховых) измерений, включая методы измерений, средства измерений (от эталонов до рабочих приборов), методики калибровки, градуировки и поверки. «Хозяином» области измерений (в терминах методологии качества – руководителем процесса), как правило, был ученый хранитель первичного эталона. Теоретические исследования в области измерений, выходя на системный уровень, требующий обобщения, получали развитие силами общетеоретического подразделения в условиях непосредственной обратной связи. Эта унитарная структура обеспечивала, с одной стороны, жесткую двустороннюю связь ТМ с метрологической практикой, с другой

стороны, обеспечивала теоретической базой процесс создания нормативных документов. Таким образом, достигалось оптимальное взаимодействие трех ветвей метрологии.

Увеличение, с ростом экономики, «размеров» прикладной и законодательной метрологии (количества измерений и средств измерений) не могло не разрушить указанную структуру. Однако найденное тогда решение могло быть эффективным только в условиях отраслевой организации народного хозяйства. С переходом к рыночной экономике отраслевая структура подверглась кардинальной деформации, но организация метрологии, если и подверглась изменениям, то явно не в соответствии с отходом экономики от отраслевого принципа. В этих условиях ТМ оказалась, естественно, самым слабым звеном метрологии и пострадала в наибольшей степени, о чем свидетельствует ее нынешнее состояние. В этой связи представляется актуальным проанализировать вопрос о том, как должна была бы развиваться ТМ в ближайшей перспективе и каковы могли бы быть приоритетные направления развития. Доклад представляет собой попытку такого рода анализа, опирающегося на опыт работы автора вначале в конкретных областях измерений, затем – исключительно в области теоретической и, наконец, в прикладной метрологии, причем в последней – как источнике теоретических обобщений.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Датчики и системы», № 4, 2018, стр.60.

## МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Т.Н. Сирая

*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*

*tnsiraya@gmail.com*

В работе прослеживается развитие методов обработки данных при измерениях за последние полвека. Выделены отличительные черты обработки данных как раздела теории измерений, включая значимость оценивания погрешностей и принципиальную роль метрологических моделей. Одним из ключевых моментов является оценивание систематических погрешностей, в том числе, на основе их рациональной рандомизации.

Разнообразие метрологических моделей продемонстрировано применительно к совместным измерениям, в том числе, показано соотношение регрессионных и конфлюентных моделей. Отмечен подход к сопоставлению качества алгоритмов обработки, основанный на их метрологической аттестации. Роль метрологических моделей в определении и сопоставлении характеристик точности показана на примере вариации Аллана.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» № 1 2018, стр. 9 – 14.

## О ВЫРАЖЕНИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИМЕНЕНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ

А. Чуновкина

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»*

[A.G.Chunovkina@vniim.ru](mailto:A.G.Chunovkina@vniim.ru)

Статья посвящена сравнительному анализу различных подходов и способов выражения точности измерений. При обсуждении важно в первую очередь учитывать два аспекта: выбор показателей точности измерений, исходя из дальнейшего применения результатов измерений, и обоснованные методы их оценивания, исходя из доступной информации. В статье обсуждаются дискуссионные вопросы суммирования характеристик систематических и случайных погрешностей и использования неопределенности в системе показателей точности измерений.

Проведен сравнительный анализ подходов и способов выражения точности технических и лабораторных измерений. Обоснована применимость неопределенности измерения при количественном выражении точности лабораторных измерений. Однако при этом отмечается, что в задачах оценивания точности методов/результатов и средств измерений сохраняется необходимость прояснения отношения количественных мер правильности, прецизионности и неопределенности измерений.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» № 12 2017, стр. 69-72

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ МЕТРОЛОГИИ

Н.Ю. Ефремова

*Белорусский государственный институт метрологии*

efremova@belgim.by

Концепция неопределенности измерений совершила настоящую революцию в современной метрологии. С момента первого издания GUM совершенствование способов оценивания неопределенности стало одной из главных задач теоретической метрологии. В настоящее время, помимо GUM, разработаны и используются для оценивания неопределенности два Дополнения к GUM: JCGM 101:2008, JCGM 102:2011, которые в значительной степени устранили несовершенства и развили основные теоретико-вероятностные подходы GUM.

Пока теоретики находятся в раздумьях по поводу дальнейшего улучшения концепции неопределенности (в том числе переработки самого GUM), в области практической и законодательной метрологии в последнее время значительно вырос интерес к концепции неопределенности измерений и ее применению для решения различных прикладных задач. Важность принятия во внимание неопределенности измерений в настоящее время широко признана также в области аккредитации лабораторий как основополагающего элемента метрологической прослеживаемости результатов измерений.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» №4 2018, стр.13-18.

## ВНУТРЕННИЕ ПРОТИВОРЕЧИЯ КОНЦЕПЦИИ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ, ЗАТРУДНЯЮЩИЕ ЕЁ ПРЕПОДАВАНИЕ В ВУЗЕ

В.Ш. Сулаберидзе, Т.П. Мишура

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического  
приборостроения (СПб ГУАП)*

В докладе указываются несоответствия, содержащиеся в документах JCGM и касающиеся декларируемых преимуществ концепции неопределённости измерений над теорией погрешности результата измерений. Это относится, в основном, к проблемам «улучшения оценки» и трансформирования функции плотности вероятностей. Отмечается, что некоторые несоответствия и внутренние противоречия концепции затрудняют её преподавание в вузах. Подчеркивается важность грамотного применения разработанных в Рекомендациях по метрологии Р 50.01.033 и Р 50.01.037 методов и правил проверки согласия выборочного распределения измеряемых значений величины с теоретическим, включая параметрические и непараметрические методы. В заключении изложена логика освещения проблемы в соответствующих разделах учебных дисциплин по теоретической и прикладной метрологии.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Приборы», № 4, 2018, стр.22-33.

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЕРИФИКАЦИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Э.И. Цветков, Е.С. Сулоева

*Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический  
Университет СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина)*

suloewa@list.ru

В работе последовательно рассматривается влияние неадекватности используемых при формировании оценок вероятностных характеристик погрешностей априорных знаний о свойствах результатов измерений и эталонов. Представлено математическое обеспечение процедуры определения зависимости достоверности от неадекватности вида распределения вероятности формируемой оценки, исключения из рассмотрения остаточной систематической погрешности результатов измерений и воспроизводимой эталоном величины, а также объема используемой выборки. Рассмотрен иллюстративный пример.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Метрология», № 3, 2018, стр.3-13

## МЕТРОЛОГИЯ В БОЛЬШОЙ РОССИЙСКОЙ ЭНЦИКЛОПЕДИИ

А.С. Дойников

ФГУП «ВНИИФТРИ»

doynikov@vniiftri.ru

В 2017 г. заканчивается уникальное издание универсальной многотомной Большой Российской Энциклопедии (БРЭ) в 35 томах (см. рисунок). Издание БРЭ осуществлено согласно Указу Президента Российской Федерации от 14.10.2002 г. № 1156.

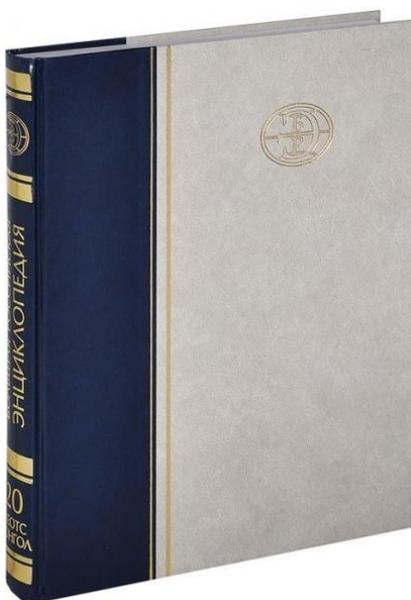


Рисунок 1. Внешний вид томов Большой Российской Энциклопедии

Предварительный том «Россия» вышел в 2004 г. В БРЭ опубликовано более 270 статей, относящихся к разделу словника «Метрология». Формированием этих концептуально объединенных статей занимался автор настоящей публикации в качестве консультанта редакции «Физика» издательства «Большая Российская энциклопедия». Статьи взаимосвязаны ссылками и кратко описывают современную понятийную систему метрологии, опирающуюся на общую теорию шкал измерений.

В Интернете на сайте [www.bigenc.ru](http://www.bigenc.ru) (поиск: Большая Российская энциклопедия) представлена в свободном доступе электронная версия статей, напечатанных в книжной версии БРЭ. Тем самым обеспечена широкая доступность БРЭ для распространения знаний по метрологии. По Распоряжению Правительства Российской Федерации от 25.08.2016 г.

№ 1791 начаты мероприятия, связанные с созданием «Общенационального интерактивного энциклопедического портала».

Электронная версия БРЭ сопровождается перечнем Рубрик по областям знаний, Персоналий и Словарём (перечнем названий статей). Перечень Рубрик: Археология, Биология, Военное дело, Всемирная история, География, Геология, Изобразительное искусство, Литература, Математика, Медицина, Музыка, Образование, Отечественная история, Политология, Психология, Религиоведение, Сельское хозяйство, Социология, Спорт, Театр и кино, **Технологии и техника**, **Физика**, Философия, Химия, Экономика, Этнология, Юриспруденция, Языкознание.

Статьи по метрологии содержатся в основном в Рубриках «Физика» (раздел «Метрология») и «Технологии и техника» (статьи о средствах измерений). Рубрика «Физика» БРЭ содержит статьи по разделам метрологии: 1 Общие понятия и метрологические организации; 2 Измерения и измерительные приборы; 3 Меры и эталоны; 4 Системы единиц и характеристики единиц; 5 Единицы измерений.

В разделе 1 основными являются статьи с названиями: Метрология, Метрическая конвенция, Международные метрологические организации, Генеральная конференция по мерам и весам, Международный комитет мер и весов, Международное бюро мер и весов, Метрическая система мер, Метрологические институты, Метрологическая служба.

В разделе 2 ключевыми являются статьи с названиями: Измеряемое свойство, Измеряемая величина, Шкала измерений, Единица измерения, Размер измеряемой величины, Размер единицы измерений, Измерение, Взвешивание, Результат измерения, Измерительная информация, Средства измерений, Измерительный прибор, Калибровка средств измерений, Поверка средств измерений, Классы точности средств измерений, Компаратор в метрологии, Неопределённость измерений, Погрешности измерений, Погрешности средств измерений.

В разделе 3 основными являются статьи: Меры, Русские меры Эталоны, Надзор метрологический.

В разделе 4 основными являются статьи: Безразмерные величины (теперь – безразмерностные величины по РМГ 29-2013), Внесистемные единицы, Естественные системы единиц, Международная система единиц, Системы единиц измерений, СГС система единиц, Английские меры, Размерность в метрологии, Размерностей анализ,

К разделу 5 относится около 200 статей, в которых даны краткие сведения о различных системных и внесистемных единицах от **акра** до **ярда**.

Кроме того, Рубрика «Физика» БРЭ содержит статьи, по содержанию относящиеся к специальным направлениям прикладной метрологии. В

этом множестве статей, в частности, даны определения большого числа измеряемых свойств и величин. Для ориентировки в этом множестве статей ниже приведена выборка названий статей из соответствующих разделов рубрики «Физика». Названия разделов и наиболее значимых статей выделены жирным шрифтом.

**Общие понятия Физики:** Импульс (Количество движения), Масса, Электрический заряд, Энергия, Фундаментальные физические константы.

**Механика:** Давление, Кинетическая энергия, Работа силы, Кинетический момент (Момент количества движения), Момент силы, Мощность, Сила в механике, Скорость, Ускорение, Момент инерции, Трения коэффициент, **Трибометрия**, Угловая скорость, Угловое ускорение, Модули упругости, Напряжение механическое, Волновое сопротивление, Гидравлическое сопротивление, Подобия теория.

**Колебания и волны:** Амплитуда колебаний, Волновое число, Волновой вектор, Групповая скорость, Декремент затуханий, Длина волны, Добротность колебательной системы, Затухание колебаний, Период колебаний, Угловая частота, Фаза колебаний, Фазовая скорость, Частота колебаний.

**Электродинамика, магнетизм:** Векторный потенциал, Ёмкость электрическая, Импеданс, Импульс электромагнитного поля, Индуктивность в электродинамике, Индуктивность взаимная, Индукции электромагнитной коэффициенты, Квадрупольный момент, Магнитный поток, Напряжение электрическое, Напряженность магнитного поля, Напряженность электрического поля, Плотность электрического заряда, Плотность электрического тока, Пойнтинга вектор, Проводимость электрическая, Разность потенциалов, Сила тока, Скалярный потенциал, Электрическое сопротивление, Электродвижущая сила, Энергия электромагнитного поля, Коэрцитивная сила, Магнитная восприимчивость, Магнитная вязкость, Магнитная индукция, Магнитная проницаемость, Магнитное сопротивление, Магнитные весы, Магнитные эталоны, Магнитный заряд, Магнитный момент, Магнитодвижущая сила, Магнитостатическая энергия, Намагниченность.

**Теория относительности, тяготение:** Времениподобный вектор, Гравитационная масса, Инертная масса, Масса покоя, Планковская длина, Планковская масса, Планковский промежуток времени, Пространственноподобный вектор, Релятивистская скорость, Сверхсветовая скорость, Скрытый импульс, Собственная система отсчета, Собственная энергия, Собственное время, Четырёхмерная скорость, Четырёхмерный интервал, Энергия покоя.

**Квантовая механика:** Амплитуда процесса, Амплитуда рассеяния, Вектор состояния, Квантовые числа, Неопределенностей соотношение,

Орбитальный момент, Сечение эффективное (в квантовой физике), Чётность.

Термодинамика: Абсолютная температура, Абсолютный нуль температуры, Давление в термодинамике, Коэффициент полезного действия, Механический эквивалент теплоты, Работа в термодинамике, Температура, Теплоёмкость, Теплота, Внутренняя энергия, Свободная энергия, Энтальпия (теплосодержание), Энтропия, Теплота фазового перехода, Тройная точка.

**Ядерная физика:** Дефект массы, Квадрупольный момент ядра, Массовое число, **Ядерная спектроскопия**, Ядерные силы, Масс-спектрометр, **Масс-спектроскопия**, Критическая масса, Активность радиоактивного источника, **Альфа-спектроскопия**, **Гамма-спектроскопия**, Период полураспада, Радиометр, **Радиометрия**, Альфа-спектрометр, Бета-спектрометр, Гамма-спектрометр, Детекторы частиц, Ионизационный калориметр, Искровой счётчик, Магнитный спектрометр, Полупроводниковый детектор, Пропорциональная камера, Пропорциональный счётчик, Совпадений метод, Спектрометр по времени пролёта, Сцинтилляционный детектор, Счётчики частиц, Черенковский счётчик, Альbedo нейтронов, Магнитная нейтронография, **Нейтронная интерферометрия**, Нейтронная спектроскопия, Нейтронные детекторы, Нейтронография, Флюенс нейтронов, Доза излучения (включая Поглощенную дозу, Эквивалентную дозу, Экспозиционную дозу, Эффективную дозу), Дозиметр, **Дозиметрия**, Качества излучения коэффициент, Керма, Микродозиметрия, **Рентгенометрия**, Изотопная хронология (Ядерная хронология), Мёссбауэровская спектроскопия.

**Атомная физика, излучение света, спектроскопия:** Ионизационный потенциал, Орбитальный момент, Спиновое квантовое число, Уровни энергии, Энергия ионизации, Энергия связи, Интенсивность излучения, Испускательная способность, Время затухания люминесценции, Выход люминесценции, Люминесцентный анализ, Флуорометр, Вакуумная спектроскопия, Двойного резонанса спектроскопия, Двухфотонного поглощения спектроскопия, Инфракрасная спектроскопия, Когерентная спектроскопия комбинационного рассеяния, **Лазерная спектроскопия**, Микроволновая спектроскопия, Нелинейная спектроскопия, **Радиоспектроскопия**, Рентгеновская спектроскопия Рентгеноэлектронная спектроскопия, Спектральные приборы, Спектрограф, Спектрометр, **Спектрометрия**, **Спектроскопия**, Спектрофотометр, **Спектрофотометрия**, Субмиллиметровая спектроскопия, Ультрафиолетовая спектроскопия, Фемто- и пикосекундная спектроскопия, Фотометрия пламён, Фототермоионизационная спектроскопия, Фурье спектрометр, Фурье-спектроскопия, Электронная спектроскопия, Квантометр, Малоуглового

рассеяния метод, Рентгеновская томография, Рентгеновский гониометр, Рентгеновский дифрактометр.

**Молекулярная физика, газы и жидкости:** Ареометр, Гидростатическое взвешивание, Дилатометр, **Дилатометрия**, Длина свободного пробега, Плотность, Сжимаемость, Теплового расширения коэффициенты, Вискозиметр, **Вискозиметрия**, Вязкости коэффициенты, Вязкость, Температуропроводность, Теплопроводность, Температура кипения, Температура плавления, Теплота испарения, Теплота плавления, Теплота сгорания, Поверхностное натяжение, Газовый термометр, Жидкостный термометр, **Калориметрия**, Калориметр, Кельвина шкала, Международная практическая температурная шкала, Пирометр (в том числе Оптический пирометр, Радиационный пирометр, Термоэлектрический пирометр), **Пирометрия оптическая**, Радиационная температура, Реомюра шкала, Температурные шкалы, **Термометрия**, Термометры (В том числе Термометр сопротивления), Фаренгейта шкала, Цельсия шкала, Влажность, Парциальное давление.

**Твёрдое тело, Физика низких температур:** Дебая температура, Ионная проводимость, Спиновая температура, Эффективная масса, Твёрдость материалов, Хрупкость, Контактная разность потенциалов, Магнетосопротивление, Параметр порядка, Решёточная теплоемкость, Термоэдс, Фотоэдс, Электронная теплоёмкость, Гониометр, Индексы кристаллографические, Координационное число, Кристаллография, Симметрия кристаллов (в том числе Пространственные группы симметрии), Примесная проводимость, Собственная проводимость, Электронная проводимость, Высокочастотная проводимость металлов, Дингля температура, Диэлектрическая восприимчивость, Диэлектрическая постоянная, Диэлектрическая проницаемость, **Диэлектрические измерения**, Электрическая прочность, Работа выхода, **Магнитная термометрия**, Низкие температуры (криогенные температуры).

**Плазма, электронная и ионная оптика:** Анодное падение, Высокочастотная проводимость плазмы, Зажигания потенциал, Ионная температура, Катодное падение, Подвижность ионов и электронов, Электронная температура, Альвена число, Дебаевский радиус экранирования, Плазменная частота, Атомно-силовой микроскоп, Атомный зонд, Ионный микроскоп, Ионный проектор (Автоионный микроскоп), Туннельный микроскоп, **Электронная микроскопия**, Электронный микроскоп, Электронный проектор (Автоэлектронный микроскоп), Энергоанализаторы.

**Оптика:** Детектирование света, Оптическая локация (Светолокация), Оптическая томография, Томография, Оптическая длина пути, Оптическая сила, Микроскоп оптический, **Микроскопия оптическая**, Монохроматор, Оптическая скамья, Предел разрешения, Разрешающая способность

оптических приборов, Светодалномер (Дальномер оптический), Светосила, Светофильтр (Оптический фильтр), Стробоскоп, Стробоскопические приборы, Теневой метод (Шлирен-метод), Ультрамикроскоп, Частотно-контрастная характеристика, Блеск, Индикатриса в оптике, Интерферометр (в том числе Жамена интерферометр, Майкельсона интерферометр, Рождественского интерферометр, Рэлея интерферометр, Фабри-Перо интерферометр), Оптическая плотность, Оптическая толщина, Ослабитель света, Ослабления показатель (Экстинкции показатель), Отражения коэффициент, Поглощательная способность, Поглощения показатель, Поглощения коэффициент, Поляризационные приборы, Поляриметр, **Поляриметрия**, Преломления показатель (Показатель преломления), Пропускания коэффициент, Разность хода лучей (в оптике), Рассеяния света коэффициент, Рассеяния света показатель, Рефрактометр, **Рефрактометрия**, Удельная рефракция, Дисперсия оптического вращения (Вращательная дисперсия), Дисперсия пространственная, Сахариметр, **Сахариметрия**, Удельное магнитное вращение, Приёмники оптического излучения (Фотоприёмники), Радиационные термоэлементы, Спектральная чувствительность, Эвапорография. **Фотометрия**, Видность, Геометрический фактор, Гетерохромная фотометрия, Гефнера свеча, Клинь фотометрический, Контраст оптический, Кубик фотометрический, Люксметр, Облученность (Энергетическая освещённость), Освечивание, Освещённость, Плотность потока излучения, Плотность энергии излучения, Поток излучения, Редуцированные фотометрические величины, Светимость, Световая отдача, Световая энергия, Световая эффективность излучения, Световой вектор, Световой поток, Световые величины, Световые единицы, **Световые измерения**, Световые эталоны, Сила излучения, Сила света, Спектральная плотность оптической величины, Спектральная чувствительность, Фотометр, Фотометр интегрирующий (Люменометр), Фотометрическая скамья, Фотометрические величины, Экспозиция (Количество освещения), Энергетическая освещённость, Энергетическая светимость, Энергетическая сила света, Энергетическая экспозиция (Количество облучения), Энергетические фотометрические величины, Энергия излучения, Яркость, Яркости коэффициент, Яркомер. **Колориметрия** (цветовые измерения), Колориметр, Основные цвета, Цвет, Цветность, Цветовой контраст, Нелинейные восприимчивости, Оптические умножители частоты, Оптические преобразователи частоты, Квантовая когерентность, Квантовая томография, Квантовые измерения, **Голографическая интерферометрия**.

**Радиофизика:** Атенюатор, Волновое сопротивление, Гиромангнитная частота (Циклотронная частота), Импеданс характеристический, Индуктивное сопротивление в цепи переменного

тока, Кварцевый генератор, Объёмный резонатор, Открытый резонатор, Отрицательное дифференциальное сопротивление, Радиоинтерферометр, **Радиолокация**, Шума коэффициент (шум-фактор), Шумовая температура.

**Квантовая электроника, лазерная физика:** Атомное время, Атомные часы, Водородный генератор, Квантовые стандарты частоты, Квантовые часы, Квантовый гироскоп, Квантовый магнитометр, Лазерная спектроскопия, Лазерный гироскоп (Фотонный гироскоп), Лидар (лазерный радар), Оптические стандарты частоты, Оптический резонатор, Прецизионные измерения, Рубидиевый стандарт частоты, Цезиевый эталон частоты, Ядерный гироскоп.

**Акустика: Аудиометрия,** Высота звука, Громкость звука, Пороги слуха (Порог слышимости), Тембр звука, Тон, Унтертон, Волновое сопротивление в акустике, Давление звукового излучения (Звуковое давление, Радиационное давление), Импеданс акустический (Акустический импеданс, Акустическое сопротивление), Импульс звуковой волны, Интенсивность звука (Сила звука), Колебательная скорость частиц, Колебательное смещение частиц, Мощность звука, Проводимость акустическая, Сопротивление акустическое, Спектр звука, Энергия звуковой волны, Голография акустическая, Скорость звука, Гидрофон, Микрофон, Объёмная скорость, Приемники звука, Радиометр акустический, Шумопеленгатор, Электроакустический преобразователь, **Акустическая спектроскопия, Гидролокация, Дефектоскопия ультразвуковая, Локация звуковая, Микроскоп акустический, Микроскопия акустическая, Ультразвуковая диагностика, Фильтр акустический, Эхолот, Заглушённая камера, Звука анализ (Анализ звука), Зонд акустический, Интерферометр акустический, Реверберационная камера, Шемомер.**

**Геофизика:** Грозоотметчик, Инclinатор, Компас магнитный, Магнитограф, Наклонение магнитное (Магнитное наклонение), Проводимость атмосферы, Склонение магнитное (Магнитное склонение), Широта геомагнитная, Экватор геомагнитный, Абсолютная Влажность, Анемометр, Анероид, Атмосферное давление (Давление атмосферное), Аэрологические приборы, Барометр, Бофорта шкала, Виртуальная температура, Влажность воздуха, Гигрометр, Гипсотермометр, Дождемер, Испаряемость, Метелемер, Метеорограф, Метеорологическая станция, Метеорологические приборы, Озонзонд, Осадкомер, Относительная влажность, Плювиограф, Психрометр, Радиозонд, Росы точка (Точка росы), Снегомер, Снегомерная рейка, **Телеметрия метеорологическая,** Термогигрограф, Ткермограф, Термометры метеорологические, Ураганомер, Флюгер, Шар-зонд, Актинограф, Актинометр, **Актинометрия,** Альbedo, Альбедометр, Балансомер, Видимость атмосферная, Мутности фактор, Нейтральная точка неба, Оптическая

масса атмосферы, Пиранометр, Пиргелиометр, Пиргеометр, Цианометр, Эффективное излучение.

**Астрофизика, звёздная астрономия: Астрополяриметрия, Астроспектроскопия, Астроспектрофотометрия, Астрофотометрия, Солнечная постоянная, Бальмеровский декремент, Блеск небесного светила, Болومتر, Гравитационный радиус, Звёздная величина (в том числе Болометрическая звёздная величина, Видимая звёздная величина, Визуальная звёздная величина), Звёздная плотность в Галактике, Избыток цвета (Колор-эксцесс), Лучевая скорость астрономического объекта (Радиальная скорость), Массы небесных тел (методы определения), Мера дисперсии, Мера эмиссии, Показатель цвета (Колор-индекс), Расстояния до космических объектов, Стетимости классы, Светимость в астрономии, Световой год, Спекл-интерферометрия, Спектральные классы звёзд, Температура (в астрофизике), Фотометрические системы, Цвет звезды, Цветовая температура, Цветовой эквивалент (Колор-эквивалент), Эффективная температура звезды, Яркостная температура, Яркость в астрономии, Красное смещение, Масштабный фактор (Фактор расширения), Сверхсветовые скорости в астрофизике, Скрытая масса, Энтропия Вселенной, Астроколориметрия, Астрометрия, Астрономогеодезия, Геодезическая астрономия, Гравиметрия, Космохронология, Мореходная астрономия, Фундаментальная астрометрия, Эфемеридная астрономия, Звёздные атласы и карты, Астрономическая единица, Астрономические постоянные, Астроориентация, Вертекс, Вертикал, Видимый диаметр светила, Всемирное время, Высота небесного светила, Галактические координаты, Галактический экватор, Галактический год, Гелиографические координаты, Географические координаты (в том числе Географическая долгота, Географическая широта), Геоцентрические координаты, Годичный параллакс звезды, Горизонт, Горизонтальные координаты в астрономии, Долгота, Долгота небесная, Зенит, Зенитное расстояние, Меридиан небесный (Небесный меридиан), Небесные координаты (Координаты астрономические), Небесный полюс, Небесный экватор (Экватор небесный), Ось мира, Параллакс в астрономии, Парсек, Прецессия в астрономии, Прямое восхождение, Селенографические координаты, Склонение в астрономии, Угол места, Часовой угол, Широта, Широта небесная, Экватор небесный, Экваториальные координаты, Эклиптические координаты, Большая полуось орбиты, Деферент планеты, Космические скорости (в том числе Первая космическая скорость, Вторая космическая скорость, Третья космическая скорость, Гиперболическая скорость, Параболическая скорость, Эллиптическая скорость), Период обращения в астрономии, Сидерический период обращения, Синодический период обращения, Эксцентриситет орбиты, Эпицикл, Эфемериды, Аномалистический год, Аномалистический месяц, Атомное время,**

Высокосный год, Время, Год, Григорианский календарь, Декада, Декретное время, Долгота дня, Драконический год, Драконический месяц, Звёздное время, Звёздные сутки, Звёздный год, Календарный год, Календарный месяц, Календарь, Лунно-солнечный календарь, Лунный год, Лунный календарь, Лунный месяц, Местное время, Месяц, Мировое время, Московское время, Неделя, Новый стиль, Полдень, Полночь, Поясное время, Сигналы времени, Сидерический год, Сидерический месяц, Солнечное время, Солнечные сутки, Среднее солнечное время, Средний полдень, Средняя гринвичская полночь, Старый стиль, Сутки, Тропический год, Хиджра, Часовые пояса, Эфемеридное время, Эра, Эталонное время, Юлианский календарь, Астрономо-геодезическая сеть, Астрономо-геодезический пункт, Астрономо-гравиметрическое нивелирование, **Геодезическая гравиметрия**, Геодезическая сеть, Геодезические знаки, Геодезические инструменты, Геодезические координаты, Геодезические линии, Геодезический пункт, Геодезический треугольник, **Геодезия**, Гравиметр, Радиогеодезия, Румб, Спутниковая геодезия, Триангуляция, Эклиметр, Алидада, Альтазимут, Астролябия, **Астрономические измерительные приборы**, Астрономические инструменты и приборы, Астрономический компас, Астроспектрограф, Астрофотометр, Атомные часы, Вертикальный круг, Вертикальный телескоп, Гартмана диафрагма, Гелиометр, Денситометр, Звёздные часы, Звёздный интерферометр, Интерферометр интенсивности, Компаратор в астрономии, Координатно-измерительная машина в астрономии, Коронграф, Лимб, Личная ошибка, Метеорный радиолокатор, Микрометры в астрономии, Микрофотометр, Мира, Нивелирование, Пассажный инструмент, Призменная астролябия, Радиометр в радиоастрономии, Секстант, Склонения ось, Солнечные часы, Спектрогелиограф, Спектрограф астрономический, Теодолит, Универсальный инструмент, Фотогелиограф, Фуко маятник, Хронограф, Часы астрономические, Экваториал.

В Рубрике «**Технологии и техника**» к метрологии могут быть отнесены следующие статьи БРЭ: Акустический контроль, Альтиметр (высотометр), Ампер-весы, Ампервольтметр, Амперметр, Амплитудная характеристика, Амплитудно-частотная характеристика, Аналого-цифровой преобразователь, Анергия, Ареометр, Астатический измерительный прибор, Астрономическая навигация, Атлас цветов, Атенюатор, Аэродинамическое сопротивление, Аэронавигация, Байт, Бит, Бринелля метод, Буссоль, Вакуумметр, Вакуумный манометр, Вариометр, Ваттметр, Весы, **Взаимности теория**, Виккерса метод, Вихретоковый поток, Влагомер, Влажность, Водоизмещение, Волноводный фильтр, Волоконно-оптический датчик, Вольтметр, Входной преобразователь, Высотометр, Гальванометр, Гидроакустическая станция, Гиперзвуковая

(сверхзвуковая) скорость, Гиروبуссоль, Гировертикаль, Гироскомпас, ГЛОНАСС (см. Спутниковая система позиционирования), Горное давление, Готовности коэффициент, Дальномер, Датчик, Девиация, Делитель напряжения, Делитель частоты, **Денситометрия**, **Дефектоскопия**, Динамометр, Дискриминатор, Дистанционное измерение, Дифферент, Дозатор, Долговечность, Доплеровский измеритель скорости, Дуплексная связь, Ёмкостный датчик, Загоризонтная радиолокация, Заземления измеритель, Затухания измеритель, Зубоизмерительный инструмент, Измерительная линия, **Измерительная техника**, Измерительный генератор, Измерительный преобразователь, Измерительный прибор, Измерительный трансформатор, Индикатор, Индукционный измерительный прибор, Калибр, Калибратор, Капиллярный контроль, Катушка индуктивности, **Квалиметрия**, Квалиметрия недр, Квалитет, Квантование сигнала, **Квантовые стандарты частоты**, Кварцевый генератор, Кегель, **Концевые меры**, Координатная измерительная машина, Космическая навигация, Курвиметр, Курсограф, Лаг, Лазерная локация, Линия задержки, Логометр, Локатор, **Локация**, Люфтомер, Магазин измерительный, **Магнитные измерения**, Магнитный контроль, Магнитоупругий преобразователь, Магнитоэлектрический измерительный прибор, Манометр, Метроном, Микрокатор, Микрометр, Микрофон, Момент крутящий, Мост измерительный, Мощности коэффициент, Мощность электрическая, Мультиметр, **Навигационные приборы**, Омметр, Оптиметр, **Оптическая локация**, Осциллограф, Относительное отверстие, Пиксел, Пистонфон, Планиметр, Плотномер, Потенциометр, Профилометр, Пьезоэлектрический преобразователь, Радар, Радиационный контроль, Радиоволновой контроль, Радиовысотометр, Радиозонд, Радиолокационная станция, **Радиолокация**, Радиомаяк, Радионавигационная система, **Радионавигация**, Расходомер, Синтезатор частот, Тензомер, Теодолит, Теплота сгорания.

Приведенный перечень статей характеризует этот уникальный источник информации о метрологии, которая фактически применяется во всех видах деятельности (Рубриках БРЭ) В завершение этой публикации для примера цитируются начала двух статей из электронной версии БРЭ.

МЕТРОЛОГИЯ (от греч. μέτρον - мера, размер и *...логия*), наука об измерениях, методах и средствах достижения их единства и требуемой точности. Применение М. позволяет получать измерительную информацию не только о количественных, но и о качественных измеряемых свойствах объектов во всех сферах человеческой деятельности. Развитие теорий и их практич. применение немислимо без первичной измерит, информации, полученной путём измерений в процессе познания. Эффективность любых банков данных, информационных и др. технологий, корректность торговых операций напрямую зависят от качества первичной, исходной измерит, информации. Последующие обработка, хранение и передача измерит, информации не могут устранить дефекты или недостаточность

этой информации. На достижения, средства и методы М. опираются в своём развитии как фундаментальные, так и прикладные науч. направления. Развитие М. - неперенное условие прогресса науки и техники. М. подразделяют на теоретич., прикладную и, в силу её обществ. значимости, законодательную.

Теоретическая метрология опирается на собственную, детально разработанную систему понятий, терминов и нормативных документов. Хотя в общей теории измерений используются теория множеств, математич. статистика, теория вероятности и др. математич. дисциплины, исходными метрологич. понятиями являются: измеряемое свойство, измеряемая величина, шкала измерений и единица измерения. Поскольку существуют шкалы измерений без единиц, но нет единиц измерений, существующих вне соответствующих шкал, понятие «шкала измерений» является первичным и более общим по сравнению с понятием «единица измерения». Под шкалой измерений понимают принятый по соглашению способ определения и обозначения (кодирования) всевозможных проявлений (значений) конкретного измеряемого свойства. Прикладные положения теории измерений основаны на понятиях: система единиц измерений, эталон, средства измерений, неопределённость измерений, погрешность измерений, единство измерений и др.

Прикладная метрология ...

Законодательная метрология ...

Историческая справка ...

Метрологические институты и организации ...

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) в РФ ...

Метрологические журналы ...

**ИЗМЕРЯЕМОЕ СВОЙСТВО**, свойство объектов (тел, веществ, полей, явлений, процессов, организмов), изучаемое с помощью измерения. Совокупность разл. проявлений к.-л. И. с. в одном или мн. объектах образует множество, элементы которого находятся в определённых логич. соотношениях (эквивалентны, отличны, отличаются порядком по размеру, пропорциональны, аддитивны и т. д.). Измерение свойства возможно только после установления для него шкалы измерений, т. е. принятия системы кодирования первичной измерительной информации о проявлениях И. с. в разл. объектах.

И. с. (масса, длина, время, частота, твёрдость, цвет и т. д.) может быть качественным и количественным. Элементы множества проявлений количественного И. с. - измеряемой величины - могут находиться в соотношениях не только эквивалентности и отличия, но и в соотношении порядка по размеру: одно проявление больше или меньше другого. Количественным И. с. соответствуют шкалы порядка для неархимедовых величин, метрические (пропорциональные и аддитивные шкалы отношений, шкалы разностей) и абсолютные шкалы - для скалярных величин. Элементы множества проявлений качественного И. с. находятся только в соотношениях эквивалентности (условной тождественности, неразличимости) или отличия. Качественными являются также комбинированные И. с., описываемые совокупностями разл. качественных и количественных свойств. Такие многокомпонентные И. с. принципиально невозможно сводить без изменения их смысла к одномерным измеряемым величинам...

## ОЦЕНИВАНИЕ РАСШИРЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

И.П. Захаров, О.А. Боцюра,

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники (ХНУРЭ)*

Рассмотрены проблемы оценивания расширенной неопределенности в первой версии пересмотренного Руководства по выражению неопределенности измерений (GUM), основанного на байесовском подходе. В статье проводится сравнительный анализ известных и предлагаемых авторами подходов к оцениванию расширенной неопределенности, выполненных на основе: действующей версии GUM, ГОСТ Р 8.736-2011, закона распространения расширенной неопределенности. Показано, что предлагаемая методика позволяет добиться хорошего совпадения оценок расширенной неопределенности с оценками, полученными методом Монте-Карло.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника», №4, 2018, стр.18-21

## ДВА МЕХАНИЗМА ВОЗБУЖДЕНИЯ ЯДРА ЛАЗЕРОМ КАК ПРОЛОГ К СОЗДАНИЮ ЯДЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ ЧАСОВ

Ф.Ф. Карпешин, Л.Ф. Витушкин, О.А. Орлов  
*ФГУП «ВНИИМ имени Д. И. Менделеева»*  
Ю.И. Гусев, Н.С. Мартынова, Ю.Н. Новиков, А.В. Попов, В.И. Тихонов,  
М. Б. Тржасковская *НИЦ «Курчатовский институт»,*  
*ПИЯФ им. Б.П. Константинова, Гатчина, Россия*  
М. Охапкин *ПТБ, Брауншвейг, Германия*

Во ВНИИМ разработана схема получения изомера  $^{229}\text{Th}$  – основы для разработки нового эталона длины и времени нового поколения. Обсуждаются перспективы дальнейших практических исследований в свете сотрудничества ВНИИМ в этой области с другими институтами.

В 2016 г. произошло знаменательное событие: открыт распад ядерного изомера  $^{229}\text{Th}$  с уникально малой энергией: 7,6 эВ [1]! Существование изомера было предсказано «на кончике пера» более тридцати лет назад. Уникальность его состоит в том, что известны всего два ядра с энергией возбужденного состояния меньше 100 эВ:  $^{229}\text{Th}$ , и еще  $^{235}\text{U}$  с энергией 76 эВ. Типичные энергии ядерных переходов составляют десятки кэВ. Именно эта уникальность и была долгое время камнем преткновения в попытках выделить нуклид в изомерном состоянии.

Здесь отметим первый важный момент. Это открытие, хотя и сделано в Мюнхене молодыми немецкими физиками, как принято на Западе – соискателями степени доктора философии, стало возможным благодаря работам, производимым сейчас во ВНИИМе. Этот факт прямо отмечен в публикации [1], со ссылкой на теоретический расчет. Прежде чем пояснить эту связь, стоит остановиться подробнее на особенностях данного нуклида и ценности его для современных научных исследований.

Основные свойства ядра  $^{229}\text{Th}$ .

Схема уровней ядра приведена на рис. 1. Основное состояние живет около 7000 лет и распадается путем альфа-распада в ядро  $^{225}\text{Ra}$ . Энергия так называемого дублетного уровня, а на самом деле просто уникально близкого по энергии и поэтому изомерного, указана как 3.5 эВ. Это старое значение, принятое на момент публикации монографии. Сейчас его общепринятое значение 7.6 эВ, но обсуждаются и другие значения.

Время жизни изомерного состояния, если бы мы его могли измерить в голом ядре, составило бы несколько часов. В нейтральном атоме и в ионах кратности от 1 до 2 время жизни существенно сокращается

благодаря возможности девозбуждения через каналы внутренней конверсии, простой или дискретной, от 10 минут до 10 микросекунд.

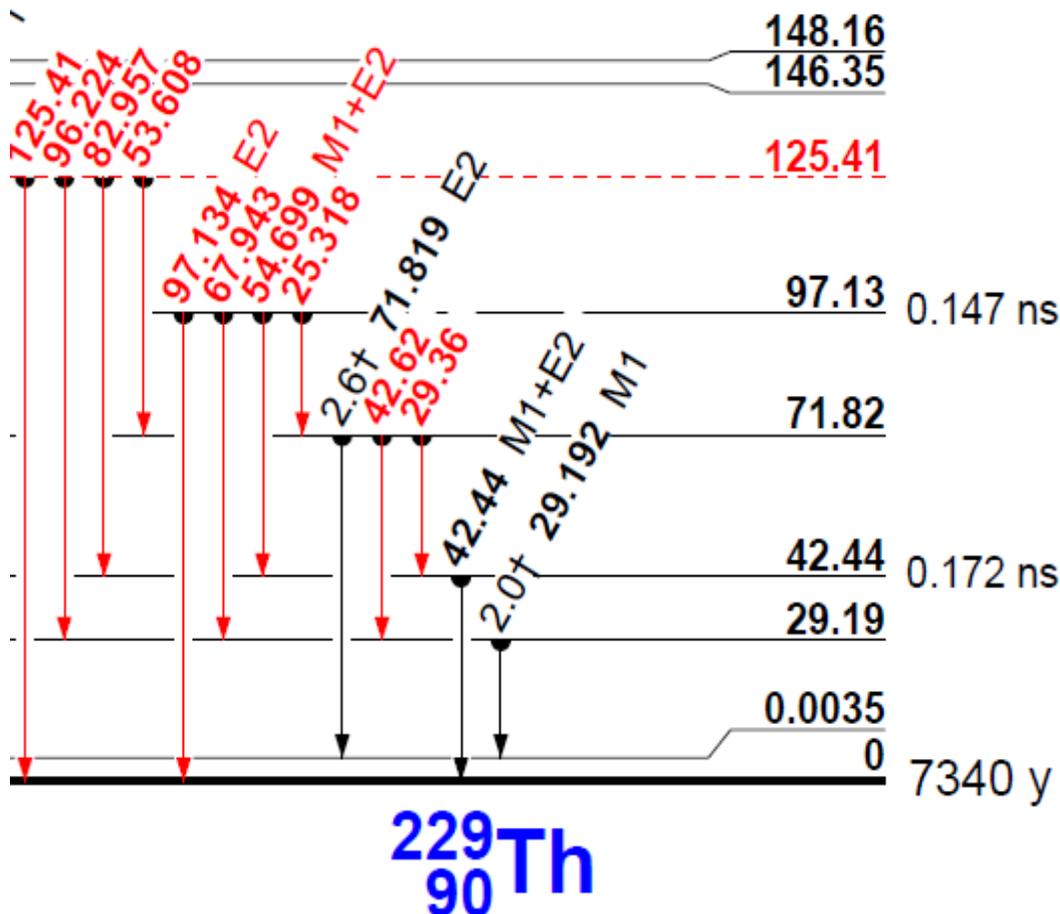


Рисунок 1. Схема уровней и переходов в ядре  $^{229}\text{Th}$  (в кэВ)

### *Ядерный эталон длины и времени*

Эталоны длины и частоты широко используются в метрологии, системах передачи данных, позиционирования, геофизике. Обширные приложения они находят в фундаментальной физике (метрология временного и пространственного постоянства констант, проверка пространственной инвариантности, гравитационный сдвиг и др.). Востребованы как стационарные установки, выдающие данные о временном и пространственном интервале, так и мобильные системы [2-4].

Современные эталоны частоты базируются на измерении частоты перехода между двумя атомными состояниями. Смещение положения уровней в присутствии внешних полей и существенное влияние столкновений с атомами окружающей среды формируют жесткие

требования к установкам, что существенно ограничивает круг возможных приложений. В отдельных лабораторных установках точность измерения достигает нескольких единиц  $10^{-18}$  [4,5]. Дальнейшее улучшение точности требует значительных усилий по развитию технологии. Точность стандартов формируемых компактными перемещаемыми системами не превышает  $10^{-14}$  [3]. В настоящее время широко обсуждается возможность использования разницы энергий основного и изомерного состояний  $^{229\text{m}}\text{Th}$  в качестве стандарта частоты [6-8]. Изомерное состояние имеет наиболее низкую из всех нуклидов энергию. Долгое время считалось, что она составляет 3,5 эВ. Сейчас принято значение 7.6 эВ. В обоих случаях эта энергия находится в пределах досягаемости современных оптических генераторов. Принципиальная возможность заселения изомерного состояния оптическими методами открывает возможность использования этого состояния в качестве осциллятора с добротностью, на несколько порядков превышающей добротность систем эксплуатируемых в настоящее время. Атомные часы на основе перехода в  $^{229}\text{Th}$  позволят достичь погрешности, не превышающей  $10^{-19}$  в однократных ионах и  $10^{-21}$  — в трехкратных ионах.

Ключевые особенности такого осциллятора:

Энергия перехода расположена в оптическом диапазоне. Это позволяет использовать оптические методы заселения изомера, что открывает возможность его эксплуатации в качестве стандарта частоты.

Малая собственная ширина состояния позволяет надеяться на качественное (1-3 порядка) улучшение точности такого стандарта частоты по сравнению с предельными значениями, получаемыми при использовании атомных состояний.

Малый размер ядра и экранировка электронами нивелирует влияние внешних полей, что позволит обеспечить стабильность эталона. Кроме того, это создает возможность эксплуатации осциллятора с точностью до  $10^{-19}$  в плотной среде, что открывает принципиальную возможность создания компактных твердотельных приборов.

Энергия изомерного перехода в основном определяется вкладом сильного взаимодействия. Во всех существующих в настоящее время стандартов частоты определяющим является электромагнитное взаимодействие. Сравнение показаний осцилляторов различной природы существенно расширяет возможность изучения временной стабильности ряда фундаментальных констант.

Постановка вопроса

В первую очередь необходимо знать наверняка, что измерять, а также интенсивность распада. Первое обстоятельство может показаться ясным: конечно, надо поймать фотоны от распада ядра. Имеют ли они

энергию 7,6 или 3,5 эВ – в принципе, это мягкий рентген, с которым в лабораториях ученые давно и успешно работают. В нейтральных атомах энергия 3,5 эВ лежит ниже порога ионизации. Поэтому другого канала не предвидится. Однако в ряде работ было показано, начиная с [9-11] и подробно описанных, например, в [12], превалирующим каналом является распад через электронные мостики – путем резонансной внутренней конверсии. То есть испущенные ядром фотоны неупруго рассеиваются на электронах оболочки. В результате вместо одного фотона испускается несколько, но гораздо более мягких, – 1 эВ и меньше, то есть рентгеновские кванты превращаются в инфракрасное излучение. То есть вероятность распада по данному каналу в 600 раз превышает вероятность прямого радиационного распада ядра! Энергия ядра как бы вытекает, по каплям просачиваясь сквозь электронную оболочку. Регистрировать такие фотоны гораздо сложнее. Однако потом в работе было указано, что энергия изомера должна быть ~7,6 эВ. Это уже превышает потенциал ионизации в случае нейтральных атомов. В свою очередь, в работе [13] было показано, что и в этом случае основным каналом распада является не прямой радиационный распад изомера, а внутренняя конверсия, причем предсказывалось время жизни: всего  $10^{-5}$  с. Перед экспериментаторами встала задача измерения столь мягких электронов внутренней конверсии, да еще за столь короткий промежуток времени. Основываясь на вычисленном времени жизни, экспериментаторы разработали схему воздушной транспортировки ядер изомера, образующихся в результате альфа-распада  $^{238}\text{U}$ , к детектору. Результат был встречен с большим интересом научной общественностью во многих странах мира.

Что же дальше?

Естественно, встает вопрос, а что же дальше. И вот тут-то во ВНИИМе и была предложена практическая схема в работах [14-16]. Для практического применения необходимо найти способ получения изомера в лаборатории, используя источник ядер в основном состоянии. В работах [12-16] как раз и разработан метод их получения путем двухфотонной оптической накачки. Схема основана на возбуждении резонансного атомного уровня  $\delta s$ , энергия которого в нейтральном атоме как раз близка к энергии изомера (рис. 1). Эксперименты проводятся в РТВ.

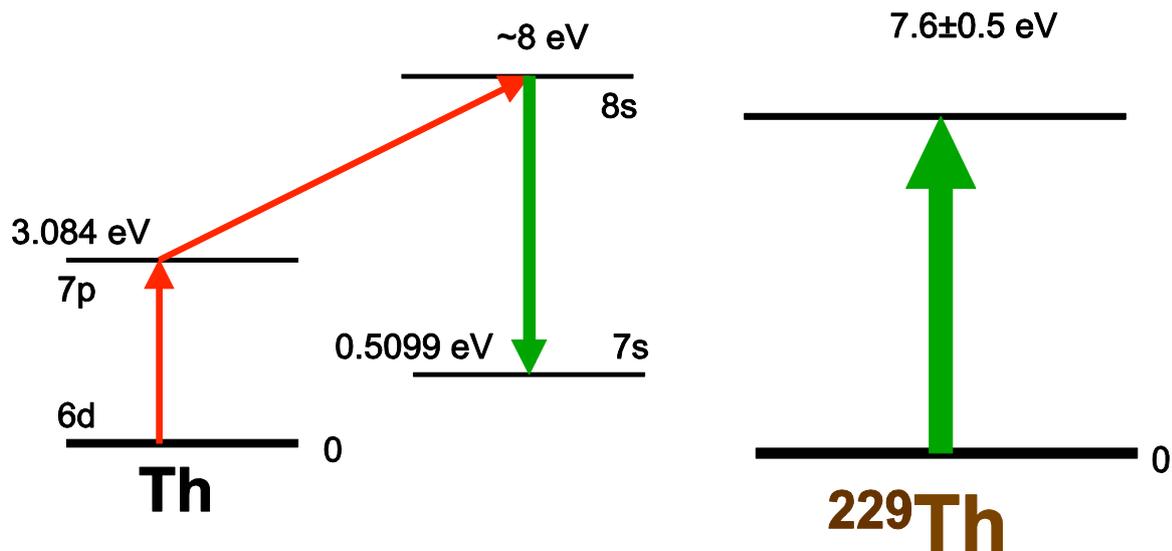


Рисунок 2. Возбуждение ядра в изомерное состояние двухфотонной оптической накачкой по методу обратного «электронного мостика» (последовательная схема процесса).

Вначале поглощается резонансный фотон  $\omega_1$ , а атом переходит из состояния  $6d$  в состояние  $7p$ . Поглощение второго (нерезонансного) фотона  $\omega_2$  переводит атом в виртуальное состояние, близкое к  $8s$  ( $j_3m_3$ ). После этого атом передает набранную энергию частично или полностью ядру, сам переходя в состояние  $7s$  ( $j_4m_4$ ).

Экспериментальное воплощение этой идеи закладывает основы новых ядерно-лазерных технологий. Сначала ставится задача измерить энергию изомера с помощью лазера с минимальной погрешностью.

С другой стороны, решение поставленной задачи невозможно без развития наших фундаментальных знаний. Создание ядерно-оптического стандарта частоты для стабилизации лазерного излучения потребует решения фундаментальнейших задач двойного электронно-ядерного резонанса. Практическое решение этих задач будет означать наступление эры новых лазерно-ядерных технологий. А результатом будет создание ядерно-оптических часов с погрешностью не хуже  $10^{-19}$ . Для решения этих фундаментальных задач надо сначала осуществить возбуждение ядра  $^{229}\text{Th}$  в изомерное состояние посредством двухфотонной лазерной оптической накачки.

#### *Проект сотрудничества с ПИЯФ*

Реализация этих уникальных особенностей в форме стандарта частоты и длины требует проведения предварительной работы по изучению свойств изомерного состояния, отработки методов генерации, охлаждения ионов  $^{229}\text{Th}$ , разработке методов возбуждения и наблюдения изомера. Работы в этом направлении ведутся в ряде научных центров

Европы и США. Недавно о начале экспериментальных работ в этом направлении заявили лаборатории во ВНИИФТРИ и МИФИ [17,18]. Следует отметить, что до настоящего времени ионный пучок, содержащий изомер  $^{229}\text{Th}$ , смогли получить только в лабораториях JYFL (Финляндия, 2006 г.) [19,20] и LMU (Германия 2016 г.) [21].

Основные проблемы, тормозящие реализацию проекта в настоящее время, связаны с большой неопределенностью энергии перехода и времени жизни изомера. Для уменьшения этих неопределенностей и для отработки основных узлов стандарта частоты предлагается создание макетного стенда для отработки методики генерации, хранения и регистрации ионов изомера  $^{229}\text{Th}$ , заселяемого в распадае урана-233. Она включает:

Создание установки для генерации, фильтрации и кондиционирования 1, 2х и 3х зарядных ионов основного и изомерного  $^{229}\text{Th}$  на основе распада урана-233. Генератор ионов может быть использован как для изучения свойств изомера, так и в качестве ионного источника стандарта частоты. От источников на основе испарения  $^{229}\text{Th}$  такой генератор отличает высокая долговременная стабильность, высокая эффективность, низкая цена материала, меньшая активность и простота эксплуатации.

Определение основных свойств распада изомера. Наблюдение распада изомера, определение энергетических и временных параметров позволит в дальнейшем эффективно и с хорошими фоновыми условиями проводить работу по заселению изомера лазерным излучением.

Планируется использовать газовый ионный источник на основе урана-233 с фильтрацией по массе и схему регистрации электрона конверсии с использованием методики «мягкой посадки» для подготовки тонкого источника. Ион тория термализуется в гелиевой среде при давлении несколько торр и извлекается электрическим полем из газовой ячейки в область дифференциальной откачки. Ион транспортируется в область высокого вакуума, проходит фильтр масс и высаживается на коллектор с энергией несколько электроновольт. В результате нейтрализации иона изомера тория открывается канал с эмиссией конверсионного электрона. Энергия электрона и время жизни изомера измеряется с помощью электростатического дефлектора и сборки микроканальных пластин.

Для реализации проекта макетного стенда потребуются:

Тонкий источник  $^{233}\text{U}$ , полная активность 4 МБк.

Газовая ячейка со схемой эвакуации ионов тория. Схема для транспортировки ионов в области дифференциальной откачки, банчирования, фильтрации по массе, «мягкой» посадки ионов.

Детектор конверсионных электронов – сборка микроканальных пластин. Альфа-детектор для контроля фона альфа-частиц.

Вакуумные насосы (2\*ТМН, 3\*форвакуумные-безмаслянные), датчики вакуума и давления, вакуумная арматура.

Источники питания, высокочастотная электроника для регистрации сигналов, управления питанием линз и банчированием.

Рассчитанный на два года реализации, проект потребует инвестирования в размере 10 млн. рублей.

Реализованный проект рассматривается как необходимая платформа для дальнейших работ по созданию беспрецедентного эталона времени. Следующая стадия работ включает заселение изомерного состояния с использованием трехуровневой методики [22-25]. Это позволит отработать схему заселения изомера и определить более точное значение энергии перехода.

Некоторые детали предложения и сравнение с существующими установками представлены в работах [26,27].

## Заключение

Из вышесказанного можно сделать вывод, что фундаментальное научное исследование в области создания ядерных часов на основе изомера  $^{229}\text{Th}$  обладает несомненной перспективой. Во-вторых, из этого видна определяющая роль теории, без которой невозможно было бы планирование эксперимента [1], как представляется и невозможным вслепую продолжение экспериментов по оптической накачке. И в-третьих, что правильно поставленные совместные исследования, несомненно, обречены на успех.

## Литература:

- 1 Wense L., Seiferle B., Laatiaoui M., Neumayr J.B., Maier H.J., Wirth H.F., Mokry C., Runke J., Eberhardt K., Düllmann C.E., Trautmann N.G., and Thierolf P.G. «Direct detection of the thorium-229 isomer: Milestone towards a nuclear clock». Nature. 2016. V. 533. P. 47–51.
- 2 F.G. Major. “The Quantum Beat. Principles and Applications of Atomic Clocks.” Second Edition. Springer 2007, ISBN-13: 978-0-387-69533-4.
- 3 Jacques Vanier, Cipriana Tomescu. “The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards. Recent Developments.”. CRC Press 2016. ISBN-13: 978-1-4665-7697-1
- 4 Andrew D. Ludlow, Martin M. Boyd, Jun Ye E. Peik, P.O. Schmidt “Optical atomic clocks”. arXiv:1407.3493v2 [physics.atom-ph] 9 Feb 2015.
- 5 Bloom B.J., Nicholson T.L., Williams J.R., Campbell S.L., Bishof M., Zhang X., Zhang W., Bromley S.L., and Ye J. An optical lattice clock with accuracy and stability at the  $10^{-18}$  level.” Nature 506: 71. (2014)

- 6 E. Peik, M. Okhapkin. “Nuclear clocks based on resonant excitation of transitions”. arXiv:1502.07322v1 [nucl-ex] 25 Feb 2015
- 7 EMMI Workshop: The  $^{229m}\text{Th}$  Nuclear Isomer Clock, GSI, Darmstadt, 25.-27.9.2012. <http://www-aix-new.gsi.de/conferences/emmi/NIC2012/>
- 8 nuClock - Project funded by the European Union <http://www.nuclock.eu/>
- 9 F.F.Karpeshin, I.M.Band and M.B.Trzhaskovskaya, «NEET revisited in connection with the resonance radiative pumping of  $^{229m}\text{Th}$ », in: Nuclear Shapes and Nuclear Structure at Low Excitation Energies. Antibes (France) 20–25 June, 1994. Abstracts of the Contributed Papers, p. 50; Proceedings of the International Conference.
- 10 F. F. Karpeshin, I.M.Band, M.B.Trzhaskovskaya and M.A.Listengarten, «Optical pumping  $^{229m}\text{Th}$  through NEET as a new effective way of producing nuclear isomers». Phys. Lett. B. 1996. V. 372. P. 1.
- 11 F. F. Karpeshin and M.B.Trzhaskovskaya, «Resonance Conversion as a dominant decay mode for the 3.5-eV isomer in  $^{229m}\text{Th}$ ». Yad. Fiz., 69, 596 (2006).
- 12 Ф. Ф. Карпешин. Деление ядра в мюонных атомах и резонансная конверсия. Санкт-Петербург: Наука, 2006.
- 13 F.F.Karpeshin and M.B.Trzhaskovskaya, «Impact of the electron environment on the lifetime of the  $^{229m}\text{Th}$  low-lying isomer». Phys. Rev., C76, 054313 (2008).
- 14 Л. Ф. Витушкин и А. И. Михайлов, «Двухфотонная ионизация атома фотонами из разных пучков». Опт. и спектр., 50, 11 (1981).
- 15 Ф. Ф. Карпешин, М. Б. Тржасковская, «Возбуждение изомера ядра  $^{229m}\text{Th}$  посредством резонансной конверсии в ионизованных атомах». Ядерная физика, 78, 765 (2015).
- 16 Ф. Ф.Карпешин, М. Б. Тржасковская, «Изомерная линия  $^{229}\text{Th}$  как репер высокоточного стандарта частоты». Измерительная техника, № 7, 2016, с. 29.
- 17 P. V. Borisyuk, O. S. Vasilyev, A. V. Krasavin, Yu. Yu. Lebedinskii, V. I. Troyan “Preparation technique of thorium films by electrochemical deposition for nuclear optical frequency standard based on thorium-229”. J Sol-Gel Sci Technol. DOI 10.1007/s10971-014-3533-z
- 18 V. I. Troyan, P. V. Borisyuk, O. S. Vasil’ev, A.V. Krasavin, S. S. Poteshin, A. A. Sysoev, D. M. Chernyshev, S. I. Donchenko, and V. G. Pal’chikov. “Quadrupole Paul ion trap in complex for optical spectroscopy of multiply charged thorium ions for the development of a nuclear frequency standard.” Measurement Techniques, Vol. 57, No. 7, October, 2014.
- 19  $^{229}\text{Th}$  by Collinear Laser Spectroscopy”. B. Tordoff, J. Billowes, P. Campbell, B. Cheal, D.H. Forest, T. Kessler, J. Lee, I.D. Moore, A.

- Popov, G. Tungate, J. Äystö, Hyperfine Interactions 171, 197 – 201 (2006).
- 20 “The search for the existence of  $^{229m}\text{Th}$  at IGISOL” V. Sonnenschein, I. D. Moore, S. Raeder, A. Hakimi, A. Popov and K. Wendt The European Physical Journal A - Hadrons and Nuclei Volume 48, Number 4 (2012), 52, DOI: 10.1140/epja/i2012-12052-3
- 21 L.v.d. Wense, B. Seiferle, M. Laatiaoui, P.G. Thirolf. The extraction of  $^{229}\text{Th}^{3+}$  from a buffer-gas stopping cell NIMB 2016, in press.
- 22 Ф.Ф. Карпешин, “Деление ядра в мюонных атомах и резонансная конверсия”. Санкт-Петербург: Наука, 2006.
- 23 Ф.Ф. Карпешин, “Резонансная внутренняя конверсия как путь ускорения ядерных процессов”. ЭЧАЯ (Проблемы элементарных частиц и атомного ядра). т.37, с.522 (2006).
- 24 F.F. Karpeshin, I.M. Band, M.B. Trzhaskovskaya, and M.A. Listengarten. «Optical pumping  $^{229m}\text{Th}$  through NEET as a new effective way of producing nuclear isomers». Phys. Lett. B, v.372, p.1 (1996).
- 25 F.F. Karpeshin, I.M. Band, and M.B. Trzhaskovskaya. «3.5-eV isomer of  $^{229}\text{Th}$ : How it can be produced». Nucl. Phys. A, v.654, p.579 (1999).
- 26 Ф. Ф. Карпешин, М. Б. Тржасковская. “Возбуждение изомера ядра  $^{229m}\text{Th}$  посредством резонансной конверсии в ионизованных атомах”. Ядерная физика, 2015, том 78, №9, с. 765–769.
- 27 Гусев Ю.И., Новиков Ю.Н., Попов А.В., Тихонов В.И. “Об Изучении Распада Изомера  $^{229}\text{Th}$  Методом Конверсионной Спектроскопии”. Известия РАН. Серия Физическая. 2016. Т. 80. № 8. С. 962-966.

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОПИСАНИЯ НЕСТАБИЛЬНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

А.А. Данилов<sup>1</sup>, Д.В. Спутнова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФБУ «Пензенский ЦСМ»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

[aa-dan@mail.ru](mailto:aa-dan@mail.ru)

Рассматриваются вопросы оценки неустойчивости средств измерений, применяемых при калибровке. Проводится анализ пригодности математических моделей для введения поправок на неустойчивость средств измерений на протяжении следующего интервала времени до наступления момента его очередной калибровки.

Сопоставительный анализ проводится для следующих моделей: средняя скорость дрейфа, усредненная по нескольким отсчетам, средняя скорость дрейфа, оцененная регрессионным методом, а также скорость дрейфа, оцененная методами простой, линейно-взвешенной или экспоненциальной скользящей средней. Сопоставление проводится не только моделированием, но и на основе обработки результатов экспериментальных исследований.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Приборы», № 3, 2018, стр.6-12

## КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ЛАБОРАТОРИЙ. ОБЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В.И. Дворкин

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН*

E-mail: dvorkin@ips.ac.ru

Рассматривается современное состояние и перспективы компьютеризации лабораторий и, в особенности, метрологических аспектов их деятельности.

В силу действия «закона Мура» происходит экспоненциальный рост быстродействия и объема памяти компьютеров, а также их удешевление. Использование компьютеров в лабораториях стало обыденным явлением, соответствующие программы совершенствуются и становятся доступнее, а программисты перестали думать об их быстродействии и об экономии памяти. Операции совершаются мгновенно, а лабораторная информация за многие годы легко умещается на жестком диске.

Помимо программ общего назначения типа Word или Excel, широко используются специально разработанные программы. Основными их видами являются LIMS (Laboratory Information Management System, ЛИС) и специализированные компьютерные программы. Каждая LIMS представляет собой единую программу. Специализированных программ в лаборатории может быть несколько, а каждая из них ориентирована на определенный вид деятельности («компьютеризация блоками»). Они используются чаще из-за простоты, удобства и низкой стоимости. В России шире всего распространены специализированные программы QControl и DControl.

Компьютеризация затрагивает и метрологические аспекты деятельности лабораторий. Расчет результатов (градуировка и проверка приемлемости), валидация и верификация, контроль стабильности и другие способы контроля качества измерений намного упрощаются при использовании компьютерных программ. При этом происходит качественный скачок. Грамотно написанная программа позволяет лабораториям использовать современные подходы (включая сложные статистические расчеты, ведение контрольных карт и т.д.) почти без затрат времени и не имея в штате квалифицированных метрологов и статистиков. Введя в компьютер результаты измерений и нажав нужную клавишу, лаборант выполняет расчет результатов (включая градуировку и проверку приемлемости) и контроль стабильности измерений, а при желании – валидацию и верификацию методики.

Не все виды метрологической деятельности легко компьютеризировать. Так, оценка неопределенности результатов измерений с использованием «бюджета неопределенностей» плохо поддается компьютеризации, так как здесь все определяют не сложные расчеты и работа с изображениями, а квалификация и знания специалиста.

В обозримом будущем компьютеризация охватит почти все лаборатории, и специализированные программы будут преобладать. Широкое внедрение метрологических новаций будет происходить через их включение в компьютерные программы.

Компьютеризация, наряду с разработкой новых и совершенствованием имеющихся методов измерений, является магистральным путем развития лабораторий. С развитием лабораторного дела, включая изменения в метрологических аспектах деятельности лабораторий, меняются и направления компьютеризации – как в аппаратном ее оформлении, так и в программном обеспечении. Ранее [1] нами было проанализировано состояние в этой области на 2006 г. Ниже сделана попытка проанализировать современную ситуацию в этой области, а также изложена наша точка зрения на перспективы применения вычислительной техники в аналитических и других лабораториях. При этом мы будем в основном рассматривать компьютерные программы, предназначенные для решения общелабораторных, особенно метрологических задач, и не будем касаться специализированных метрологических лабораторий (таких, как лаборатории метрологических НИИ).

Для каких целей могут применяться (и применяются) компьютерные программы в лабораториях

Исходя из природы лабораторных исследований, а также с учетом современных требований к обеспечению их качества [2, 3], можно выделить основные виды лабораторной деятельности, которые подлежащие компьютеризации:

- управление приборами и получение сигнала;
- градуировка методик измерений (МИ);**
- расчет результатов измерений, включая проверку их приемлемости;**
- оценка метрологических характеристик методик при их постановке в лаборатории («верификация» методик);**
- контроль стабильности результатов и другие способы внутрилабораторного контроля;**
- регистрация поступающих в лабораторию проб и отслеживание их движения внутри лаборатории;
- подготовка протоколов и их передача заказчикам исследований;

учет и хранение документов, изменений и дополнений к ним, архивных копий;

ведение списков заказчиков и субподрядчиков;

учет реактивов, материалов и стандартных образцов;

**учет и контроль состояния оборудования (средств измерений, испытательного и вспомогательного оборудования);**

учет сотрудников и слежение за своевременностью повышения ими квалификации;

регистрация претензий и корректирующих действий, планирование и контроль результатов внутренних проверок и анализа со стороны руководства;

хранение и печать информации как для использования в самой лаборатории, так и для внешних организаций (например, при аккредитации).

Жирным шрифтом выделены «метрологические» аспекты деятельности лабораторий.

Рассмотрим перечисленные задачи с позиций возможности и полезности их компьютеризации.

Управление приборами и получение сигнала – традиционная сфера применения вычислительной техники. Компьютеризация приборов, включающая в себя управление приборами, регистрацию аналитического сигнала (а также, во многих случаях, расчет результатов измерений) интенсивно развивается. Используются и специализированные чипы и компьютеры, являющиеся неотъемлемой частью приборов и устройств, и обычные персональные компьютеры. Мы не будем их рассматривать.

Градуировка методик выполнения измерений и расчет их результатов, включая проверку приемлемости, во многих случаях компьютеризируются вместе с аналитическим прибором. Однако в большинстве лабораторий применяются (и будут применяться в обозримом будущем) методики, в которых не используются компьютеризированные приборы. Вычислительная техника при этом нужна для упрощения работы, особенно для реализации различных вариантов используемого при градуировке метода наименьших квадратов. А при проверке приемлемости результатов измерений [3] без компьютера необходимо держать в памяти или рассчитывать с.о. повторяемости (сходимости) для разных диапазонов определяемых концентраций используемых методик (см. ниже).

Верификацию МИ, контроль стабильности измерений [3], и другие виды внутрिलाбораторного контроля [4] практически невозможно выполнять без использования компьютера. Помимо достаточно сложных статистических расчетов, при которых необходимо использовать

табличные значения статистических функций и приписанных характеристик МИ, необходимо вести множество контрольных карт, при этом отслеживая состояние каждой из них и периодически уточняя контрольные пределы [5]. Попытки делать это вручную (а карты рисовать на миллиметровой бумаге) почти всегда заканчиваются неудачей.

Регистрация поступающих в лабораторию проб, их кодирование, отслеживание движения пробы в лаборатории (особенно когда для ее исследования применяются разные МИ), подготовка протоколов – не слишком сложные процедуры при их выполнении вручную. Однако применение компьютеров позволяет повысить надежность этих операций (уменьшить число ошибок, происходящих на этапах поступления проб в лабораторию и выписки результатов), и дает огромный выигрыш для интенсивно работающих лабораторий.

Ведение лабораторной документации, связанной с системой качества лаборатории, хранение и печать содержащейся в ней информации также резко усложняется при увеличении размеров лаборатории. В отсутствие компьютеризации основную сложность представляет необходимость централизованного ведения большого числа журналов при децентрализации многих функций (работа с документами, учет реактивов и стандартных образцов, поверка приборов и т.д.). Отдельная проблема – необходимость своевременности действий по закупке реактивов, поверке средств измерений, обучению сотрудников и пр. При выполнении современных требований [2, 6], обязательных для аккредитованных лабораторий, объем этой деятельности возрастает, и в крупных лабораториях в отсутствие компьютеризации для этого приходится выделять специальных сотрудников.

Таким образом, практически все виды деятельности современной лаборатории, поддаются компьютеризации, и мы видим, что процесс оснащения лабораторий компьютерной техникой идет весьма активно.

### *Современное состояние компьютеризации лабораторий*

Важнейшим фактором, определяющим современное положение дел в этой области, является продолжающееся действие «закона Мура» – эмпирического наблюдения, согласно которому число транзисторов на единице площади кремниевого кристалла удваивается каждые два года. Из-за этого происходит экспоненциальный рост быстродействия и объема памяти компьютеров с одновременным их удешевлением. В результате использование компьютеров в лабораториях стало обыденным явлением (стоимость обычного компьютера составляет несколько тысяч рублей, а лабораторную сеть, охватывающую все помещения типичной лаборатории,

можно построить за 100-300 тыс. рублей, что соответствует цене среднего спектрофотометра).

С другой стороны, программисты перестали думать о быстродействии программ и об экономии памяти. Все операции (расчеты, построение изображений и т.д.) совершаются мгновенно, а лабораторная информация за многие годы работы легко умещается на обычном жестком диске. На первый план выходят используемые в лабораториях программы, практически полностью определяющие стоимость компьютеризации.

Используемые в лабораториях компьютерные программы общего назначения можно условно разделить на три группы (рис. 1):

- **LIMS (Laboratory Information Management Systems)**<sup>1</sup> - программные (иногда – программно-аппаратные) комплексы, каждый из которых пытается охватить все стороны деятельности лаборатории;

- **специализированные программы**, каждая из которых предназначена для решения тех или иных конкретных задач (**компьютеризация «блоками»**).<sup>2</sup> Под блоками здесь понимаются виды деятельности в лаборатории - выполнение расчетов, ведение документации и т.д.;

- **«офисные» программы** названные нами так потому, что они либо входят в состав пакета Microsoft Office (Microsoft Corporation, США) – наиболее распространенного в России – или аналогичны им. Так, программу Microsoft Word часто используют при подготовке протоколов исследований (предварительно создав соответствующие шаблоны), на основе приложений к Microsoft Excel создают мини-программу для ведения контрольных карт и т.д. Рассмотрим достоинства и недостатки каждого класса программ.

**LIMS.** Общее описание LIMS приведено в [7]. На рынке представлены несколько десятков подобных программ. В России используются как адаптированные зарубежные LIMS, так и программы отечественной разработки, причем появляются все новые, но все они претендуют на охват всех или большинства вышеперечисленных видов лабораторной деятельности. Поэтому при взаимодействии разных частей программы возникает огромное число связей между ними. Все это не только приводит к очень сложным системам, но даже заставляет использовать специальную терминологию, не используемую обычно в лабораториях [8]. Вследствие этого LIMS, несомненным преимуществом

---

<sup>1</sup> В отечественной литературе используются аббревиатуры ЛИС (лабораторные информационные системы) и ЛИУС (лабораторные информационно-управляющие системы).

<sup>2</sup> Иногда специализированные программы этой группы называют также «mini-LIMS», программами типа «Лабораторный журнал» и т.д.

которых является полная или почти полная компьютеризация деятельности лаборатории, имеют существенные недостатки. Это:

- высокая начальная стоимость системы (от 2 млн. рублей);
- необходимость серьезного обучения сотрудников лаборатории, так как обычного владения компьютером на уровне пользователя для работы с ней недостаточно;
- необходимость существенной перенастройки программы при изменениях в работе лаборатории, например, при реорганизации или появлении новых методов исследований. При этом необходимо участие специалистов фирмы-производителя, что ведет к дополнительным расходам.

По мнению разработчиков LIMS, высокие затраты на их установку и эксплуатацию могут окупаться (см., например, [9]) за счет следующих факторов:

- сокращение персонала за счет более эффективного использования оставшихся сотрудников;
- оптимизация использования оборудования.

Кроме того, часто полагают, что при использовании LIMS уменьшается количество ошибок при регистрации данных.

Однако ожидаемой экономии после внедрения LIMS не происходит. В стабильно работающей лаборатории не удастся сократить штаты, так как все и так более или менее загружены (а имеющаяся специализация исполнителей не позволяет свободно перебрасывать их с одного вида исследований на другой), а эксплуатация LIMS еще и требует специального персонала. Даже если в результате внедрения LIMS в очень крупных лабораториях и удастся сократить рядового сотрудника, при существующем уровне оплаты труда это практически не влияет на окупаемость системы. Не удастся и уменьшить количество приборов – есть LIMS или нет, измерения все равно надо проводить. Экстренные ситуации успешно разрешаются опытными руководителями без всяких компьютеров. Такая ситуация сохранится и в обозримом будущем.

Отдельно рассмотрим вопрос об ошибках при регистрации результатов измерений. Конечно, при непосредственном подключении всех приборов к LIMS вводить данные вручную не надо. Однако это дорого и не всегда возможно. Кроме того, во многих сферах (например, в фармакологических лабораториях) фиксация первичных результатов измерений на бумаге с «живой» подписью исполнителя обязательна. Поэтому результаты измерений чаще всего вводятся с клавиатуры. Количество ошибок при ручном вводе невелико, и они в большинстве случаев выявляются при проверке приемлемости результатов измерений либо при подготовке протоколов. Таким образом, внедрение LIMS мало влияет на число такого рода ошибок.

Из сказанного очевидно, что внедрение LIMS обычно экономически неэффективно. Поэтому реально их использует небольшой процент лабораторий крупных предприятий, которые и оплачивают издержки.

**Специализированные программы (компьютеризация «блоками»).** Такие программы наиболее распространены. Это либо самостоятельные программы, либо «усеченные» варианты LIMS. Как уже было сказано, эти программы предназначены для компьютеризации лишь части перечисленных выше видов деятельности лабораторий. Конечно, существуют простые программы, решающие узкие задачи – например, расчет градуировочной характеристики или ведение контрольных карт – но они постепенно исчезают. Современная специализированная компьютерная программа решает комплекс задач.

С учетом специфики разных видов деятельности в лаборатории, перечисленных выше, можно объединить их в группы («блоки»), каждая из которых «естественно» компьютеризируется в рамках одной программы (рис. 2). При этом важно удобство использования каждой программы, а не простота ее написания. Стоимость отечественной программы этого класса в настоящее время лежит в диапазоне 50-150 тыс. руб. (данные на май 2017 г.). Рассмотрим программы для каждого блока в общем виде и на примере наиболее распространенных в России программ QControl и DControl.

**Блок работы с приборами** нет смысла детально обсуждать в данной статье, поскольку соответствующие программы являются составной частью приборов (см. выше).

**Блок задач расчета результатов и контроля качества** – это в основном работа лаборанта. Такие задачи решаются в программе QControl [10]. Основой ее является электронный лабораторный журнал (Рис. 3), в который вводятся первичные данные (например, аналитический сигнал при химическом анализе). Предварительно в программу вводятся все нужные сведения о МИ: способ расчета окончательно приводимого результата, стандартные отклонения повторяемости (сходимости) и воспроизводимости, методы проверки приемлемости результатов и контроля стабильности и т.д. Программа автоматически рассчитывает результаты измерений по формуле либо по градуировочной зависимости, проводит проверку приемлемости каждого результата и рассчитывает окончательно приводимый результат, выполняет контроль стабильности измерений и т.д. Кроме того, с помощью программы QControl можно проводить и другие расчеты, например, для верификации или валидации МИ.

**Блок задач, связанных с регистрацией поступающих в лабораторию проб, отслеживанием их движения внутри лаборатории и генерацией протоколов** в большинстве лабораторий решаются отдельной

группой или выделенным сотрудником. В рамках идеологии специализированных программ для этих целей используется отдельная программа (блок) SControl, взаимодействующая с лабораторным журналом программы QControl. Вместе они представляют собой LIMS.

**Задачи, связанные с ведением лабораторной документации** решаются с помощью программы DControl (Document Control). Поскольку эти задачи в основном соответствуют ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 [1], программа имеет несколько разделов, каждый из которых соответствует одному из разделов этого документа (рис. 4). При этом с помощью программы DControl удастся решить следующие основные задачи, связанные с документацией:

- хранение информации по всем разделам;
- контроль своевременность закупок, проверок и профилактики средств измерений, заключения договоров, обучения сотрудников, проверок и т.д.;
- печать сведений по всем разделам программы и соответствующие требованиям вышестоящих и контролирующих организаций и органов по аккредитации и т.д.

Другими словами, на основе программы DControl можно построить систему управления качеством лаборатории. Нам неизвестны другие программы, специально предназначенные для решения этого блока задач.

#### **«Офисные» программы**

Это программы общего назначения. Конечно, они используются в лабораториях для создания текстов, отчетности и т.д., но применение программ, специально разработанных для лабораторий, резко ограничивает их использование.

### *Компьютеризация и метрологические аспекты деятельности лабораторий*

Конечно, компьютеризация затрагивает и метрологические аспекты деятельности лабораторий. Расчет результатов (градуировка и проверка приемлемости с получением окончательно приводимого результата), валидация и верификация МИ, контроль стабильности и другие способы контроля качества измерений намного упрощаются при использовании компьютерных программ. При этом происходит качественный скачок: грамотно написанная программа позволяет лабораториям использовать современные подходы (включая сложные статистические расчеты, ведение контрольных карт и т.д.) почти без затрат времени и не имея в штате квалифицированных метрологов и статистиков. Введя в компьютер результаты измерений и нажав нужную клавишу лаборант выполняет расчет результатов (включая градуировку и проверку приемлемости) и

контроль стабильности измерений, а при желании – валидацию и верификацию методики. Компьютеры также позволяют упростить слежение за своевременностью поверки средств измерений и их технического обслуживания

**Градуировка.** Компьютерные программы используются для построения градуировочной характеристики достаточно давно. Основным преимуществом при этом являются снижение трудоемкости вычислений, объем которых достаточно велик даже в классическом линейном регрессионном анализе с использованием МНК в варианте Гаусса и резко возрастает при использовании взвешенного МНК или при нелинейной градуировке. Использование описанных выше программ в рутинных лабораториях позволяет легко строить и использовать практически любую описанную в МИ градуировочную характеристику.

**Расчет результатов измерений, включая проверку их приемлемости.** Если МИ требует выполнять одно измерение, трудоемкость расчета результатов невелика (хотя и в этом случае использование компьютеров весьма полезно). Однако все намного усложняется, когда МИ предусматривает два и более измерений – таково большинство современных методик. Современные рекомендации [3] требуют в таких случаях проводить проверку приемлемости, позволяющую избежать влияния грубых промахов на окончательно приводимый результат. Процедура предусматривает на первом этапе сравнение размаха полученной для образца выборки (разности наибольшего  $X_{\max}$  и наименьшего  $X_{\min}$  результата измерений) с пределом сходимости методики измерений:

$$X_{\max} - X_{\min} \leq CR_{0.95}(n), \quad (1)$$

где  $n$  – объем выборки (число измерений),  $CR_{0.95}(n) = f_n \sigma_r$ ,

$f_n$  – «коэффициенты критического диапазона» [2],

$\sigma_r$  – стандартное отклонение повторяемости (сходимости) методики (норматив).

Для двух измерений – наиболее частый случай – это неравенство имеет вид:

$$|X_1 - X_2| \leq r, \quad (2)$$

где  $r = CR_{0.95}(2) = 2.77 \sigma_r$ .

В случае невыполнения неравенств (1, 2) обычно выполняются дополнительные измерения, размах получившейся выборки сравнивается с новым  $CR_{0.95}(n)$ , и в зависимости от результатов за окончательно приводимый результат принимается либо среднее, либо медиана выборки. Зависимость  $\sigma_r$  (а, следовательно, и  $r$ ) от измеряемой величины почти всегда известна (и приведена в тексте методики). В отечественной практике абсолютное или относительное с.о. сходимости задается

постоянным либо во всем диапазоне измеряемых величин, либо в каждом из нескольких поддиапазонов, – в виде функции  $\sigma_r(X)$ .

Однако при практической реализации этих алгоритмов возникает ряд проблем. Лаборант должен помнить или иметь перед глазами величины  $CR_{0.95}(n)$ , что непросто. Кроме того, когда измеренные величины  $X$  оказываются в разных поддиапазонах, нужны дополнительные вычисления [11]. Практика показывает, что без компьютеризации корректная проверка приемлемости (а значит, и расчет окончательно приводимого результата измерений) не выполняется, а с использованием компьютерных программ – происходит автоматически и мгновенно (хотя, конечно, дополнительные измерения проводить приходится).

**Оценка метрологических характеристик методик при их постановке в лаборатории («верификация» методик)**, также как их валидация в ходе аттестации МИ, требуют громоздких вычислений. Эти процедуры легко выполняются с помощью компьютерных программ, особенно верификация в ходе контроля стабильности [5].

**Контроль стабильности измерений** с ведением контрольных карт практически невозможен без использования компьютеров. Неудачные попытки заставить лаборатории делать это предпринимались в медицине еще в 1980-е годы, однако реально внедрение этой процедуры происходит лишь по мере появления в лабораториях компьютерных программ. При их использовании все происходит автоматически (хотя, конечно, контрольные материалы исследовать надо), и только в случае сбоя решение должен принимать более или менее компетентный сотрудник. Другие способы внутрилабораторного контроля [4] также легко реализуются помощью компьютерных программ.

**Учет и контроль состояния средств измерений** значительно облегчается при ведении компьютерного учета – фактически исчезают ситуации с использованием не поверенных по невнимательности СИ. При использовании специализированных программ это делается в программах для ведения документации, например, DControl [12].

Таким образом, сложные метрологические процедуры легко и просто реализуются в реальных лабораториях с помощью современных компьютерных программ. При этом от тех, кто их выполняет, не требуется глубоких знаний метрологии и математической статистики – соответствующие алгоритмы и нужные сведения уже заложены в компьютер, и все происходит более или менее автоматически. Конечно, желательно, чтобы в каждой лаборатории был кто-то более или менее компетентный в этой области, но не более того.

Не все виды метрологической деятельности легко компьютеризировать. Так, оценка неопределенности результатов измерений с использованием «бюджета неопределенностей» плохо

поддается компьютеризации. Мы анализировали такую возможность и пришли к выводу, что реально можно компьютеризировать, да и то частично, лишь сложение погрешностей (стандартных неопределенностей) и рисование диаграмм Исикавы – самые простые этапы такой оценки. Все остальное – выявление этапов измерения, вносящих существенный вклад в общую неопределенность, и оценки этого вклада – компьютеризации поддается плохо. Здесь все определяют не сложные расчеты и работа с изображениями, а знания и квалификация специалиста.

Обобщая, можно сделать вывод, что в обозримом будущем компьютеризация охватит практически все лаборатории, и будут преобладать специализированные программы. Дорогие LIMS в обозримом будущем, как и сейчас, будут иметь весьма ограниченное применение - в лабораториях, имеющих богатого «спонсора» (главным образом крупные успешные предприятия).

При этом требования к метрологическому обеспечению выполняемых измерений будут выполняться легко и просто, а узкие специалисты по метрологии и обеспечению качества будут исчезать – во всяком случае у них появится время на другие дела. А широкое внедрение метрологических новаций будет происходить через их включение в распространенные компьютерные программы – ведь известно, что легко осваивается то, что просто сделать.

## Литература

- 1 Дворкин В.И. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008, т. 74, № 12, с. 58-63.
- 2 ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025 – 2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».
- 3 ГОСТ Р ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.
- 4 РМГ 76-2014 ГСИ. Внутренний контроль качества результатов количественного химического анализа.
- 5 Дворкин В.И. Метрология и обеспечение качества химического анализа. М.: Из-во МИТХТ. 2014. 423 с.
- 6 Приказ Министерства экономического развития РФ от 30 мая 2014 г. N 326 "Об утверждении Критериев аккредитации ...»
- 7 ГОСТ Р 53798-2010 «Стандартное руководство по лабораторным информационным менеджмент-системам (ЛИМС)».
- 8 Куцевич И.В. / Мир компьютерной автоматизации. 2002. № 4. [www.LimsSource.com](http://www.LimsSource.com).

- 9 Меркуленко Н.Н. // Лабораторные информационные системы LIMS. Сборник статей: ООО “Маркетинг. Информационные технологии”. 2006. С. 215-219.
- 10 Р 50.2.003-2002. Рекомендации по метрологии. ГСОЕИ. Внутренний контроль качества результатов измерений. Пакет программ QControl. ИПК Издательство стандартов, 2000 (с поправкой, опубл. в ИУС №2, 2003 г.).
- 11 Дворкин В.И. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. т. 82. № 12. С. 71-72.
- 12 [www.qcontrol.ru](http://www.qcontrol.ru)



Рисунок 1. Классификация программ для компьютеризации лабораторий

Управление приборами

#### **РАБОТА С ПРИБОРАМИ**

Градуировка МИ  
 Проверка приемлемости и расчет результатов измерений  
 Контроль стабильности результатов  
 Другие способы контроля качества  
 «Валидация» методик

#### **РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТАТОВ И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА**

Регистрация проб  
 Отслеживание их движения в лаборатории  
 Генерация протоколов  
 Статистика

## РЕГИСТРАЦИЯ ПРОБ И ГЕНЕРАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ

Учет и хранение документов  
Работа с заказчиками и субподрядчиками  
Учет реактивов, материалов и стандартных образцов  
Учет и контроль состояния оборудования  
Учет сотрудников и их обучения  
Регистрация претензий и корректирующих действий  
Внутренние проверки и анализ со стороны руководства

## ВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Рисунок 2. Блоки лабораторной деятельности (задачи, «естественно» решаемых в рамках одной специализированной программы)



Рисунок 3. Принципиальная схема Лабораторного журнала программы QControl.

# АЛГОРИТМ ПОЛУЧЕНИЯ СОВМЕСТИМЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ КЛЮЧЕВЫХ СЛИЧЕНИЙ

Н.А. Бурмистрова

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»*

N.A.Burmistrova@vniim.ru

14 октября 1999 года было подписано соглашение о взаимном признании измерительных эталонов, сертификатов калибровок и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами (MRA) [1]. Основой для реализации MRA являются ключевые сличения национальных эталонов, результатом которых является установление степени их эквивалентности. В соответствии с соглашением под эквивалентностью эталонов понимается степень согласованности результатов измерений, выполняемых с помощью эталона конкретного национального метрологического института (НМИ), с опорным значением ключевых сличений. Последнее подразумевает согласованность результатов измерений участников сличений друг с другом. Степень эквивалентности эталона выражается количественно как отклонение результата от опорного значения ключевого сличения и неопределенность этого отклонения. Первым этапом при оценивании данных ключевых сличений является вычисление опорного значения сличений, которое интерпретируется как оценка значения измеряемой величины, полученная по результатам измерений всех участников сличений.

В большинстве случаев при вычислении опорного значения принимают базовую модель (модель «общего среднего»):

$$X = X_i \quad (1)$$

где  $X_i$  – измеряемая величина в каждой лаборатории. Все участники сличений измеряют одну и ту же величину и представляют измеренное значение и соответствующую неопределенность  $x_i, u_i, i=1, \dots, n$ .

Согласованность данных и модели проверяется с использованием критерия  $\chi^2$ . Если данные согласованы, то существует общепринятый подход к вычислению опорного значения и степеней эквивалентности [2].

Если данные оказываются несогласованными, то не существует общепринятого метода обработки таких данных.

Существует много алгоритмов обработки несогласованных данных, но все они являются эвристическими [3–15]. Условно их можно разделить на две группы. К первой группе относятся алгоритмы, которые нацелены на формирование согласованного множества (подмножества) результатов измерений путем исключения некоторых из них, расширения

неопределенности опорного значения, увеличения неопределенностей измерений участников сличений. Вторую группу составляют алгоритмы, в которых для описания несогласованности результатов измерений вводятся дополнительные величины, часто отождествляемые со степенями неэквивалентности эталонов. Оценивание этих величин требует предположений, которые достаточно сложно обосновать или проверить на практике.

Принцип получения согласованного множества положен и в основу предлагаемого подхода. В предлагаемом ниже подходе неопределенности измерений расширяются каждым НМИ индивидуально таким образом, чтобы сформировать согласованное множество результатов измерений и определить степени эквивалентности в соответствии с MRA. Для взаимного признания результатов измерений участниками ключевого сличения необходима метрологическая совместимость результатов и калибровок, получаемых в этих НМИ. Метрологическая совместимость результатов измерений означает, что расхождения между измеренными значениями не превышают расширенной неопределенности разности этих значений

$$|x_i - x_j| \leq 2u(x_i - x_j) \quad (2)$$

Условие (2) часто записывают в виде отношений, которые при совместимости данных не должны превосходить единицу (критерий  $E_n$ ):

$$E_n = |x_i - x_j| / 2\sqrt{u_i^2 + u_j^2} < 1$$

Участники сличений представляют измеренное значение и соответствующую (стандартную) неопределенность  $x_i, u_i, i=1, \dots, n$ . Если предварительный анализ показывает несогласованность данных сличений, в частности, для ряда попарных разностей измеренных значений не выполняются условия (2), то предлагается расширить неопределенности измерений  $\tilde{u}_i^2 = \alpha_i u_i^2$  таким образом, чтобы при измененных значениях неопределенности указанные условия выполнялись для всех пар результатов измерений. Для получения единственного решения  $\alpha_1^*, \dots, \alpha_n^*$  предлагается минимизировать некоторый функционал  $F \alpha_1, \dots, \alpha_n$  при заданных условиях. Следовательно, задачу можно сформулировать как

$$\min_{\alpha_1, \dots, \alpha_n} F \alpha_1, \dots, \alpha_n \text{ при условии } |x_i - x_j| \leq 2\sqrt{\alpha_i u_i^2 + \alpha_j u_j^2} \text{ и } \alpha_1 \geq 1, \dots, \alpha_n \geq 1 .$$

В настоящей работе рассмотрен функционал  $F \alpha_1, \dots, \alpha_n = \sum_i \alpha_i u_i^2$ , соответствующий минимизации неопределенности среднего значения. При поиске экстремума функционала применены численные методы. После того, как неопределенности измерений расширены и сформировано множество совместимых результатов измерений, опорное значение

вычисляется как средневзвешенное с использованием всех результатов измерений. Сокращенно предлагаемый метод был назван MCS (metrological compatibility set), поскольку в результате его применения получается множество совместимых результатов измерений.

Рассмотрим применение данного подхода на примере ключевых сличений ССQM-K5. В отчете о сличениях ССQM-K5 в качестве опорного значения выбрано простое среднее, а соответствующая неопределенность вычислена через выборочное стандартное отклонения результатов измерений разных НМИ. Поэтому неопределенность опорного значения превышает неопределенности измерений для части участников сличений. В табл. 1 приведены значения критерия  $E_n$  для попарных разностей результатов измерений. Полужирным шрифтом выделены значения, которые превышают единицу, что указывает на несовместимость соответствующих результатов измерений.

Таблица 1 – Значения критерия  $E_n$  для попарных разностей результатов измерений

НМИ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	<b>1,07</b>	<b>1,72</b>	0,07	0,71	0,06	0,93	0,64	<b>1,37</b>	<b>3,90</b>
2	<b>1,07</b>	–	<b>1,01</b>	0,49	<b>2,27</b>	0,85	0,14	<b>2,07</b>	0,45	<b>3,55</b>
3	<b>1,72</b>	<b>1,01</b>	–	0,89	<b>2,58</b>	<b>1,50</b>	0,69	<b>2,46</b>	0,63	<b>1,69</b>
4	0,07	0,49	0,89	–	0,20	0,10	0,52	0,18	0,63	<b>1,70</b>
5	0,71	<b>2,27</b>	<b>2,58</b>	0,20	–	0,68	<b>1,66</b>	0,05	<b>2,50</b>	<b>5,53</b>
6	0,06	0,85	<b>1,50</b>	0,10	0,68	–	0,79	0,62	<b>1,13</b>	<b>3,35</b>
7	0,93	0,14	0,69	0,52	<b>1,66</b>	0,79	–	<b>1,57</b>	0,19	<b>2,43</b>
8	0,64	<b>2,07</b>	<b>2,46</b>	0,18	0,05	0,62	<b>1,57</b>	–	<b>2,31</b>	<b>5,19</b>
9	<b>1,37</b>	0,45	0,63	0,63	<b>2,50</b>	<b>1,13</b>	0,19	<b>2,31</b>	–	<b>2,87</b>
10	<b>3,90</b>	<b>3,55</b>	<b>1,69</b>	<b>1,70</b>	<b>5,53</b>	<b>3,35</b>	<b>2,43</b>	<b>5,19</b>	<b>2,87</b>	–

Анализ табл. 1 позволяет сделать вывод, что несогласованность результатов вызвана недооценкой неопределенности измерений частью участников сличений, а не присутствием одного-двух результатов измерений, существенно отличных от большинства (выбросов).

Результаты применения метода MCS представлены в табл. 2, где приведены исходные данные сличения ССQM-K5, коэффициенты и измененные неопределенности измерений, полученные при обработке данных с помощью соответствующего алгоритма. Можно констатировать, что неопределенности измерений у половины участников (НМИ 1, 2, 4, 6, 7) практически не изменились. Существенно возросла неопределенность измерений для НМИ 10, результат которого изначально сильно отклонялся от остальных.

Таблица 2 – Исходные данные сличения ССQM-K5, коэффициенты  $\alpha$  и измененные неопределенности измерений, полученные при обработке данных с помощью алгоритма MCS

НМИ	$C_i$ , мкг/г	$u_i$ , мкг/г	$\bar{\alpha}$	$u_i$ , мкг/г
1	1,4980	0,0110	1,1	0,0121
2	1,5250	0,0060	<b>1,0</b>	0,0060
3	1,5540	0,0120	2,4	0,0283
4	1,4930	0,0320	<b>1,0</b>	0,0320
5	1,4800	0,0070	3,5	0,0244
6	1,5000	0,0110	<b>1,0</b>	0,0110
7	1,5290	0,0130	<b>1,0</b>	0,0130
8	1,4810	0,0080	2,9	0,0231
9	1,5350	0,0080	1,8	0,0140
10	1,6060	0,0070	8,3	0,0581

Вычисление попарного критерия  $E_n$  (табл. 3) для модифицированных данных, как и следовало ожидать, показывает совместимость всех результатов измерений при минимальном расширении неопределенностей измерений для отдельных участников сличений.

Таблица 3 – Значения критерия  $E_n$  для попарных разностей результатов измерений, полученные при обработке данных с помощью алгоритма MCS

НМИ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	–	0,99	0,91	0,07	0,33	0,06	0,87	0,33	0,99	0,91
2	0,99	–	0,50	0,49	0,90	0,99	0,14	0,92	0,33	0,69
3	0,91	0,50	–	0,71	0,99	0,89	0,40	0,99	0,30	0,40
4	0,07	0,49	0,71	–	0,16	0,10	0,52	0,15	0,60	0,85
5	0,33	0,90	0,99	0,16	–	0,37	0,89	0,01	0,98	0,99
6	0,06	0,99	0,89	0,10	0,37	–	0,85	0,37	0,98	0,90
7	0,87	0,14	0,40	0,52	0,89	0,85	–	0,91	0,16	0,65
8	0,33	0,92	0,99	0,15	0,01	0,37	0,91	–	0,99	0,99
9	0,99	0,33	0,30	0,60	0,98	0,98	0,16	0,99	–	0,59
10	0,91	0,69	0,40	0,85	0,99	0,90	0,65	0,99	0,59	–

Расширение неопределенности измерений для части участников с целью достижения совместимости всех результатов измерений, безусловно, может вызывать возражение со стороны тех, чьи результаты изначально оказались согласованными с опорным значением. Поэтому естественный вопрос, который возникает при применении предлагаемого подхода, насколько получаемые значения коэффициентов расширения неопределенности  $\sqrt{\alpha_i}$  зависят от «выбросов». В отчете по сличениям ССQM.K-5 при расчете опорного значения не учитывали результаты НМИ

3 и 10 (см. табл. 1). Поэтому метод MCS применяли к трем множествам: включающему все результаты измерений (MCS<sub>1</sub>); за исключением десятого результата (MCS<sub>2</sub>); за исключением третьего и десятого (MCS<sub>3</sub>). Результаты, приведенные в табл. 4, показывают устойчивость предлагаемого метода к наличию «выбросов». Это означает, что если результат, полученный от какого-то НМИ, существенно отличается от других, то увеличивается неопределенность именно этого результата, а результаты других при этом не ухудшаются.

Таблица 4 – Значения коэффициентов расширения при применении метода MCS ко всем результатам (MCS<sub>1</sub>), кроме 10 (MCS<sub>2</sub>), кроме 3 и 10 (MCS<sub>3</sub>)

$\sqrt{\alpha_i}$	MCS <sub>1</sub>	MCS <sub>2</sub>	MCS <sub>3</sub>
$\sqrt{\alpha_1}$	1,1	1,1	1,0
$\sqrt{\alpha_2}$	1,0	1,0	1,3
$\sqrt{\alpha_3}$	2,4	2,5	–
$\sqrt{\alpha_4}$	1,0	1,0	1,0
$\sqrt{\alpha_5}$	3,5	3,1	3,0
$\sqrt{\alpha_6}$	1,0	1,0	1,0
$\sqrt{\alpha_7}$	1,0	1,0	1,0
$\sqrt{\alpha_8}$	2,9	2,6	2,6
$\sqrt{\alpha_9}$	1,8	2,1	2,2
$\sqrt{\alpha_{10}}$	8,3	–	–

Как уже отмечалось, НМИ неохотно идут на расширение неопределенностей, поэтому далее рассмотрена модификация алгоритма MCS, расширяющего неопределенности измерений у минимального числа лабораторий. Такой подход соответствует формированию наиболее согласованного множества результатов измерений, поэтому алгоритм сокращенно назвали (largest metrological compatible set – LMCS). Отличие от алгоритма наибольшего согласованного подмножества (largest consistent subset – LCS) [7] заключается в том, что критерием формирования подмножества является не  $\chi^2$ , а выполнение условий совместимости для всех пар результатов измерений, входящих в это подмножество:

$$|x_i - x_j| < 2\sqrt{u_i^2 + u_j^2}$$

Для сличения ССQM-K5 наиболее согласованное подмножество образуют результаты НМИ 1, 4, 5, 6, 8 (см. табл. 1). Неопределенности измерений для оставшихся участников (2, 3, 7, 9, 10) расширяются с применением метода MCS, т. е. минимально увеличиваются неопределенности таким образом, чтобы выполнялось условие попарной эквивалентности результатов измерений. Это достигается минимизацией

функционала  $\min_{\alpha_1, \dots, \alpha_n} F$  при условиях

$$|x_i - x_j| \leq 2\sqrt{\alpha_i u_i^2 + \alpha_j u_j^2} \text{ и } \alpha_1 = 1, \dots, \alpha_m = 1, \alpha_{m+1} \geq 1, \dots, \alpha_n \geq 1,$$

где  $F_{\alpha_1, \dots, \alpha_n} = \sum_i \alpha_i u_i^2$ ;  $m$  – число участников сличений, результаты которых вошли в наиболее согласованное множество и, соответственно, неопределенности измерений которых не изменились,  $m = 5$  для сличений ССQM-K5. Сопоставление алгоритмов MCS и LMCS представлено в табл. 5.

Таблица 5 – Сопоставление применения алгоритмов MCS и LMCS

НМИ	Исходные данные		MCS		LMCS	
	$C_i$ , мкг/г	$u_i$ , мкг/г	$\bar{\alpha}$	$u_i$ , мкг/г	$\bar{\alpha}$	$u_i$ , мкг/г
1	1,4980	0,0110	1,1	0,0121	<b>1,0</b>	0,0110
2	1,5250	0,0060	<b>1,0</b>	0,0060	3,6	0,0214
3	1,5540	0,0120	2,4	0,0283	3,0	0,0363
4	1,4930	0,0320	<b>1,0</b>	0,0320	<b>1,0</b>	0,0320
5	1,4800	0,0070	3,5	0,0244	<b>1,0</b>	0,0070
6	1,5000	0,0110	<b>1,0</b>	0,0110	<b>1,0</b>	0,0110
7	1,5290	0,0130	<b>1,0</b>	0,0130	1,8	0,0235
8	1,4810	0,0080	2,9	0,0231	<b>1,0</b>	0,0080
9	1,5350	0,0080	1,8	0,0140	3,3	0,0266
10	1,6060	0,0070	8,3	0,0581	8,9	0,0626
$x_{\text{ref}}, u_{\text{ref}}$	1,513	0,0095	1,5176	0,0041	1,4916	0,0041

Из табл. 5 следует, что методы MCS и LMCS приводят к расширению неопределенностей измерений для разных участников. В дальнейшем алгоритм LMCS не рассматривается, поскольку, как показал анализ, он может приводить к неоправданному существенному расширению неопределенности только одного результата из пары несогласованных результатов измерений, когда результаты расположены по разные стороны от опорного значения. Такое расширение неопределенности вызывает смещение опорного значения ключевых сличений. В общем случае неопределенность опорного значения, вычисленного по LMCS, больше полученного по методу MCS. В случае сличений ССQM-K5 значения функционалов, составили  $F_{MCS} = 0,006994$ ,  $F_{LMCS} = 0,008335$ .

Заключение. В докладе предложен метод оценивания несогласованных данных ключевых сличений, основанный на формировании множества метрологически совместимых результатов измерений участников сличений. Проведен анализ данного метода на основе реальных данных сличений, показана его устойчивость по отношению к присутствию «выбросов» среди результатов измерений участников сличений. В дальнейшем планируется провести исследование данного метода с использованием модельных данных, полученных статистическим моделированием. Достоинством предлагаемого алгоритма является: индивидуальное расширение неопределенности измерений для ряда участников по итогам сличений до уровня, обеспечивающего совместимость результатов измерений всех участников, и обоснованное установление опорного значения и соответствующей неопределенности измерений. Данный метод может быть рекомендован для оценивания несогласованных данных сличений

## Литература

- 1 BIPM 1999. Mutual Recognition of National Measurement Standards and of Calibration and Measurement Certificates issued by National Metrology Institutes (MRA) [Официальный сайт] <http://www.bipm.org> (дата обращения 20.01.2014 г.).
- 2 Cox M. G. “The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset”, 2007, *Metrologia* 44, pp. 187-200
- 3 Lira I. Combining inconsistent data from interlaboratory comparisons // *Metrologia*. 2007. V. 44. P. 415–421.
- 4 Elster C., Toman B. Analysis of key comparison data: critical assessment of elements of current practice with suggested improvements// *Metrologia*. 2013. V. 50. P. 549–555.
- 5 Weise K., Wöger W. Removing model and data non-conformity in measurement evaluation// *Meas. Sci. Technol.* 2000. V. 11. P. 1649–1658.
- 6 Willink R. Statistical determination of a comparison reference value using hidden errors// *Metrologia*. 2002. V. 39. P. 343–354.
- 7 Cox M. G. The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset// *Metrologia*. 2007. V. 44. P. 187–200.
- 8 Elster C., Toman B. Analysis of key comparisons: estimating laboratories’ biases by a fixed effects model using Bayesian model averaging// *Metrologia*. 2010. V. 47. P. 113–119.
- 9 White D. R. On the analysis of measurement comparisons// *Metrologia*. 2004. V. 41. P. 122–131.
- 10 Sutton C. M. Analysis and linking of international measurement comparisons// *Metrologia*. 2004. V. 41. P. 272–227.

- 11 Toman B, Possolo A. Laboratory effects models for interlaboratory comparisons// Accreditation and Quality Assurance. 2009. V. 14. P. 553–563.
- 12 Чуновкина А. Г., Бурмистрова Н. А., Звягин Н. Д. Об одном подходе к оцениванию результатов ключевых сличений эталонов при несогласованных данных // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 3–6; Chunovkina A. G., Burmistrova N. A., Zvyagin N. D. An approach for evaluating the results of key comparisons of standards with inconsistent data // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N 6. P. 577–583.
- 13 Chunovkina A. G., Zviagin N. D., Burmistrova N. A. In-terlaboratory Comparisons. Practical Approach for Data Evaluation// АСТА ИМЕКО, 2013, V. 2. N 2. P. 28-33.
- 14 Burmistrova N. A., Zviagin N. D. The algorithm for obtaining metrological compatibility of measurement results while analyzing key comparison data 5th COOMET Competition for Young Metrologists, June 2013, Braunschweig, P. 1–4.
- 15 CCQM-K5. Key Comparison – Determination of pp'-DDE in Fish Oil. Final Report, March 2001 [Офиц. сайт]. [http: www.bipm.org](http://www.bipm.org) (дата обращения 30.11.2013 г.)

## Секция № 02 «Электрические измерения»

Содержание	стр.
Е.З. Шапиро, Г.Б. Гублер, А.Ю. Никитин, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> Эталонная база электроэнергетики и ее развитие на основе современных информационно-измерительных технологий	57
М.Л. Гуревич, В.И. Шевцов, <i>АО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц», ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> Российские электротепловые и диодно-детекторные технологии для измерителей переменных напряжений высшей точности	68
Л.А. Баталов, В.В. Нестеров <i>ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова»</i> Калибровка преобразователей индукции магнитного поля методами нелинейной оптимизации»	84
А.А. Львов, С.А. Кузин, П.А. Львов <i>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.</i> Новый формирователь сигнала «петля переменного тока» для параметрических датчиков	98
В.Д. Мазин <i>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого</i> Обобщённая геометрическая модель измерительного преобразования	108

## ЭТАЛОННАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЕЕ РАЗВИТИЕ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Е.З. Шапиро Г.Б. Гублер, А.С. Никитин

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»*

Текущее состояние и перспективы развития эталонной базы измерений в электроэнергетике, по крайней мере, на период до 2030 г. связаны с сегодняшним состоянием и прогнозируемым развитием этой крупнейшей отрасли экономики [1].

Экономические задачи электроэнергетики в части требований, предъявляемых к огромному парку средств измерений (СИ), насчитывающему десятки миллионов единиц, и соответственно к системе их метрологического обеспечения, являются первостепенными.

Среди требований экономики электроэнергетики, непосредственно связанных с измерениями, можно выделить как основные:

- обеспечение торговых операций на внутреннем и внешних энергетических рынках, поскольку электрическая энергия - это прежде всего товар;

- обеспечение эффективного технического управления процессами производства (генерация), транспортирования (электрические сети) и потребления (промышленность, сельское хозяйство, ЖКХ и т.д.) этого товара;

- обеспечение энергосбережения путем снижения потерь электрической энергии на всех отмеченных этапах ее жизненного цикла;

- обеспечение безопасности энергообъектов и экологической безопасности, включая широкое использование возобновляемых источников энергии, альтернативных углеводородным.

Приоритетность отмеченных требований не остается неизменной с течением времени и одинаковой для стран с различными энергоресурсами и экономикой.

Если в прошлом столетии, вплоть до последних десятилетий, во всем мире усилия метрологов и энергетиков были направлены на повышение точности измерений количества электрической энергии и минимального набора показателей ее качества, то с начала XXI века приоритетными задачами в электроэнергетике становятся обеспечение безопасности энергосистем (раннее предупреждение и устранение аварийных ситуаций) и обеспечение надежного функционирования сложных сетевых комплексов с множеством источников и потребителей электрической энергии.

Вызвано это тем, что экономические потери от крупных системных аварий (США, 2003, Канада, 2005, Москва и Калужская область, 2010, С. Петербург, 2016, Екатеринбург и другие на всех континентах) существенно превышают технические потери в электрических сетях и создают опасность для здоровья и жизни людей.

Необходимость экономически эффективного и безаварийного управления постоянно растущими потоками мощностей, поставляемых разнородным потребителям, создающим нестабильные, нелинейные нагрузки и разделенных сотнями километров, потребовала создания новых измерительных технологий, вплоть до введения определений новых измеряемых величин и создания нового класса адекватных им СИ.

Практическая реализация метрологического обеспечения новых измерительных технологий и СИ требует, в свою очередь, модернизации отечественной эталонной базы электроэнергетических измерений путем расширения ее функциональных возможностей при максимально возможном сохранении аппаратной части действующих первичных эталонов.

Действующая эталонная база электроэнергетических измерений состоит из трех крупных блоков, обеспечивающих единство измерений электроэнергетических величин (ЭЭВ):

1. Государственный первичный эталон (ГПЭ) единиц коэффициента и угла масштабного преобразования синусоидального тока ГЭТ 152-2011 (УНИИМ) с расширенной неопределенностью воспроизведения единиц  $(4,0 - 14) \cdot 10^{-6}$  и  $(4,0 - 14) \cdot 10^{-6}$  рад и комплекс эталонных компараторов и трансформаторов тока, обеспечивающий калибровку масштабных преобразователей тока в диапазоне до 50 кА.

2. Государственный первичный специальный эталон (ГПСЭ) единиц коэффициента масштабного преобразования и угла фазового сдвига электрического напряжения переменного тока промышленной частоты ГЭТ 175-2009 (ВНИИМС) с расширенной неопределенностью воспроизведения единиц  $(3,0 - 5,0) \cdot 10^{-5}$  и  $(4,0 - 10) \cdot 10^{-5}$  рад и комплекс эталонных трансформаторов и делителей напряжения, обеспечивающий калибровку масштабных преобразователей напряжения в диапазоне до 450 кВ.

3. ГПЭ единиц электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2012 (ВНИИМ), с расширенной неопределенностью воспроизведения единиц активной (ватт) и реактивной (вар) электрической энергии  $(15 - 47) \cdot 10^{-6}$  и комплекс эталонных СИ электрических мощности и энергии, обеспечивающий калибровку однофазных и трехфазных СИ в области напряжений до 1000 В, токов до 10 А и углов сдвига фаз между напряжением и током от 0 до 360 градусов.

ГПЭ 153-2012 воспроизводит единицы ватт и вар на основе национальных единиц напряжения (ГПСЭ единицы электрического напряжения (вольта) в диапазоне частот  $10 - 3 \cdot 10^7$  Гц, ГЭТ 89-2008, ВНИИМ), сопротивления (ГПЭ единицы электрического сопротивления, ГЭТ 14-2014, ВНИИМ) и частоты (ГПЭ единиц времени, частоты и национальной шкалы времени, ГЭТ 1-2012, ВНИИФТРИ).

Немного истории развития эталонной базы электроэнергетики во ВНИИМ. Работы по созданию исходных средств измерений (СИ) электрической мощности проводились во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева с начала 50-х годов. В 1986 г. во ВНИИМ был создан Государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы электрической мощности ГЭТ 153-86, который впервые обеспечил централизованное воспроизведение единицы ватт и ее передачу СИ электрической мощности и энергии в стране [2].

Создание эталона подняло уровень точности исходного средства измерений мощности в стране до мирового уровня того времени, что было подтверждено рядом международных сличений, включая ключевые сличения ССЕМ К5 (1998-2000 гг.), и ввело нашу страну в достаточно узкий круг стран, располагающих независимыми эталонами единицы мощности, т.е. эталонами, воспроизводящими национальную единицу Ватт на основе национальных единиц – Вольт, Ом и Герц.

В период с 1986 по 2012 гг. в лаборатории электроэнергетики ВНИИМ был создан эталонный комплекс средств электроэнергетических измерений, обеспечивший потребности промышленности тех лет, возможность участия в международных сличениях эталонов и, как следствие, признание результатов наших измерений на международных энергетических рынках.

Динамика развития этого комплекса представлены в таблице 1.

Таблица 1

Эталон	Цель и результаты
1986 ГЭТ 153-86 Государственный первичный эталон	Обеспечение разработки отечественных СИ Кл. 0,05 и признания на внешних рынках
1988 ВЭТ 153-88 Вторичный эталон	"Энергомера" - Разработка первых образцовых СИ энергии Кл. 0,05 - 02
1990 Трансватт-1. Транспортируемый эталон сравнения	Первые международные сличения Финляндия (Германия) (0,001 – 0,005%)
1992 Трансватт-3.1. Эталонный трех-фазный счетчик активной энергии	ПО "КВАНТ" - Исходное СИ, выпуск образцовых трехфазных СИ энергии.

1995 Трансватт-1.2 - Эталон сравнения	Сличения. Корея (KRISS), Австралия (CSIRO-NPL) ( $\Delta$ ) $\pm$ 0,001%
1998 Трансватт-3.2 – Эталонный счетчик активной и реактивной энергии	Обеспечение выпуска и импорта СИ активной и реактивной энергии
1999 Модернизация ГЭТ 153-86	Ключевые международные сличения CCEM-K5.
2002 Подсистема измерения гармонических составляющих напряжения и тока	Обеспечение калибровки анализаторов мощности
2005 "Энергомонитор 3.1К" Эталонный многофункциональный прибор. Уровень вторичного эталона.	Метрологическое обеспечение СИ электроэнергии и контроля качества.
2008 Эталонная установка УППУ-МЭЗ.1	Обеспечение ЦСМ и ведомственных МС. Калибровка и поверка на местах работы СИ.
2010 – 2011 Частичная модернизация ГЭТ 153-86	Участие в ключевых сличениях АРМР. ЕМ. К 5.1 (май 2011г.)
2010 –2011 Вторичный эталон единицы эл. мощности трехфазный. (опытный образец)	Передача единицы ВАТТ СИ активной и реактивной мощности и энергии. Калибровка и поверка наиболее точных СИ ПКЭ и параметров сетей.

В первом десятилетии XXI века отечественные и зарубежные приборостроители освоили выпуск многофункциональных эталонных СИ электрической мощности с границами допускаемых погрешностей измерений 0,01-0,02 % и с возможностью измерений показателей качества электрической энергии (ПКЭ) и параметров энергетических сетей (ПЭС). Возможности адаптации аналогового ГЭТ 153-86 к требованиям нового парка эталонных СИ ЭЭВ оказались исчерпанными, и его дальнейшая модернизация была признана нерациональной

В 2012 г. был утвержден новый ГПЭ единиц электрической мощности Ватт и вар в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц (ГЭТ 153-2012), основанный на методах математической обработки результатов синхронных аналого-цифровых преобразований мгновенных значений напряжения и тока с возможностью синхронизации этих преобразований с Международной шкалой координированного времени (UTC) [3].

Внешний вид ГЭТ 153-2012 и структура его программного комплекса, обеспечивающего реализацию алгоритмов воспроизведения единиц представлены на рис.1а и 1б.



Рис. 1а

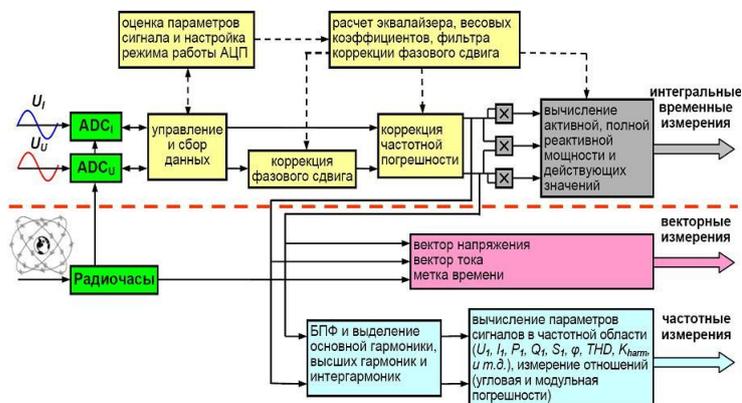


Рис. 1б

В результате создания нового первичного эталона были решены следующие задачи:

- Повышена точность воспроизведения единицы активной электрической мощности в широких диапазонах напряжений, токов, углов сдвига фаз и частот в 1,5 - 2,5 раза;
- Обеспечено воспроизведение единицы реактивной электрической мощности (вар);
- Обеспечено воспроизведение единиц в инфразвуковой области частот (1 – 40 Гц);
- Обеспечена информационная совместимость эталона России с эталонами ведущих в данной области измерений стран для проведения международных сличений;
- Частично решена задача передачи единиц средствами векторных измерений, синхронизованных со шкалой координированного времени (UTC), поддерживающих международный протокол IEC 61850-9-2.

Основное преимущество ГЭТ 153-2012 перед его предшественником состоит в том, что принятые в нем метод и алгоритм воспроизведения единиц и их аппаратная и программная реализация открывают возможности дальнейшего расширения функциональных возможностей эталона в части воспроизведения единиц измерений широкого круга ЭЭВ, в частности ПКЭ и векторных величин. На рис.1б выше пунктирной линии показаны основные блоки программного обеспечения (ПО), реализованные в действующем ГЭТ 153-2012, и обеспечивающие воспроизведение средних значений активной и реактивной электрической мощности и передачу действующих значений электрического напряжения и тока на

уровне вторичных эталонов единиц этих величин. Ниже пунктирной линии показана структура блоков ПО, которые должны быть созданы для воспроизведения единиц измерений параметров электрических сигналов в частотной области, в частности, показателей качества электрической энергии и единиц векторных измерений [4].

Сегодня единый подход к разработке методик калибровки (поверки) ЭЭВ, утверждаемых при испытаниях типа СИ, отсутствует, что не гарантирует единства выполняемых с их помощью измерений. Естественно, нет необходимости обеспечивать прямую прослеживаемость измерений всех более чем 40 наименований ЭЭВ к соответствующим эталонам. Например, отклонение напряжения или частоты от номинальных значений в статических режимах достаточно хорошо прослеживаются к соответствующим первичным эталонам. Выбор группы ЭЭВ, измерения которых должны быть поддержаны специализированными средствами воспроизведения их единиц, представляется достаточно важным как с метрологической, так и с экономической точек зрения.

Актуальность этой работы определяется массовостью работ по калибровке (поверке) многофункциональных СИ ЭЭВ и подтверждается международными работами, в которых ВНИИМ принимает участие. Это: Европейская метрологическая программой исследований и инноваций (EMPIR), проект Trace PQM "Пути прослеживаемости для измерения качества электрической энергии» и проводимые впервые ключевые международные сличения эталонов единиц мощности гармоник ССЕМ-К13.

Отдельной и сравнительно новой для нашей метрологии задачей является воспроизведение единиц измерений векторных величин и создание отечественных эталонных СИ в этой области.

Для решения этих задач в лаборатории электроэнергетики ВНИИМ проводятся исследования в двух основных направлениях:

- Обеспечение воспроизведения единиц измерений показателей качества электрической энергии (ПКЭ) и параметров электрических сетей (ПЭС), измерения которых не охвачены действующими поверочными схемами;
- Обеспечение прослеживаемости результатов измерений электрических величин, характеризующих параметры интеллектуальных электрических сетей (SmartGrid).

Особенности многих измеряемых электрических величин и ЭЭВ как их части состоит в том, что при одном и том же значении величины, выраженном в одной и той же единице измерений, они могут иметь множество форм физической реализации и характеризующих их параметров, определяющих методы, средства и погрешности их измерений.

Покажем это на примере величины – электрическое напряжение, единица измерения – вольт (В).

Основные формы физической реализации электрического напряжения:

1 напряжение постоянного тока;

2 напряжение переменного тока:

- гармоническое или аperiодическое (на интервале измерения);
- синусоидальное, несинусоидальное, импульсное;
- напряжение линейное и фазное (для трехфазных сетей);
- напряжения прямой, нулевой и обратной последовательностей.

Каждая из форм характеризуется рядом параметров напряжения (ПЭН), которые, по существу, и являются измеряемыми величинами:

- мгновенное значение
- среднеквадратическое значение (СКЗ);
- среднее значение;
- амплитудное (пиковое) значение;
- средневывпрямленное значение;
- СКЗ основной гармоники;
- СКЗ высших гармоник;
- СКЗ интергармоник;
- СКЗ суммы высших гармоник.

Помимо характеристик, измеряемых в вольтах, измеряемое напряжение характеризуется рядом безразмерных параметров, определяемых, как правило, в виде отношения параметров напряжения, измеренных в вольтах. Это различные коэффициенты: амплитуды, формы, искажений, отдельных гармонических составляющих, прямой, обратной и нулевой последовательностей в трехфазных цепях и другие.

Мгновенное значение напряжения, которое имеет смысл только в привязке к углу сдвига фазы относительно известного синхроимпульса или в отдельных случаях относительно точки перехода функции напряжения через ноль, условно принятой за нулевой угол сдвига фазы, становится одним из важнейших параметров, особенно при переходе к синхронизированным векторным измерениям. К параметрам электрического напряжения относятся также углы сдвига фаз гармоник относительно основной или углы основной гармоники относительно других напряжений и токов в электрической цепи.

Из всех перечисленных выше видов и параметров электрического напряжения непосредственная прослеживаемость результатов измерений обеспечивается только для напряжения постоянного тока (ГЭТ 13-2001) и действующего значения синусоидального напряжения переменного тока (ГЭТ 89-2008).

Аналогичные параметры характеризуют и электрический ток и, со значительным дополнением, активную и реактивную электрические мощности. Прослеживаемость измерений этих параметров также не обеспечивается действующими первичными эталонами.

Особенность параметров электрического напряжения (ПЭН) в отличие от параметров электрического тока (ПЭТ) и параметров электрической мощности активной (ПЭМа) и реактивной (ПЭМр) состоит в том, что часть из них, характеризующая электрическую энергию, поставляемую потребителю, как товар, получили дополнительно наименование – "показатели качества электрической энергии" (ПКЭ). Одни и те же по определению ПЭН могут не относиться к ПКЭ, если их измерения имеют иное назначение (управление энергопотреблением, защита энергообъектов и т.д.)

Различия между одноименными ПКЭ и ПЭН состоит в том, что по условиям работы внутренних и внешних энергетических рынков для ПКЭ устанавливаются в международных стандартах ([5], [6]) жесткие нормы и для обеспечения единства их измерений регламентируются методы измерений, интервалы интегрирования результатов единичных измерений и границы допускаемых погрешностей измерений ([7], [8]). Для ПЭН с теми же наименованиями обязательная регламентация норм, методов и погрешностей измерений не предусмотрена. В зависимости от объектов и целей измерений они отражаются в ведомственных стандартах или методиках измерений. Например, СКЗ напряжения, как ПКЭ, должно измеряться на интервале 10 периодов с пределом допускаемой погрешности  $\pm 0,1\%$ , а СКЗ напряжения, как ПЭН, в зависимости от потребности может быть измерено на одном периоде с большей или меньшей погрешностью.

Таким образом, работа по первому из указанных направлений должна обеспечить прослеживаемость результатов измерений значительно более широкого круга ЭЭВ, чем ПКЭ, и в более широких диапазонах метрологических характеристик.

Второе направление работ связано с необходимостью метрологического обеспечения измерений в интеллектуальных электрических сетях (SmartGrid), которые рассматриваются как стратегическое направление развития электроэнергетики XXI века.

Цель создания интеллектуальных сетей – это повышение надежности системы энергоснабжения, энергосбережение и экологическая безопасность, переход от традиционного наращивания мощностей за счет углеводородных энергоносителей и строительства новых сетей к рациональному использованию имеющихся сетей, ресурсов и экологически чистых возобновляемых источников энергии.

О том насколько велик размах работ в мире по созданию интеллектуальных сетей, говорят многомиллиардные инвестиции государственных агентств США, Китая, Японии, Евросоюза и промышленных альянсов в научные и инженерные разработки. Например, только в Евросоюзе в программе метрологического обеспечения SmartGrid на 2010 - 2014 гг. (2 этап 2014 - 2019) участвуют 22 страны, 18 НМИ и 4 университета.

В нашей стране работы по созданию интеллектуальных сетей сосредоточены в основном в ОАО «ФСК ЕЭС», и Институте Энергетических исследований РАН. В основу работ по созданию в стране современного электроэнергетического комплекса России положена «Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью», в которой даны идеология, базовые технологии и механизмы реализации.

Во множестве задач, которые ставят интеллектуальные сети, для нас важно понять и выделить задачи метрологические. Управляющие воздействия, оптимизирующие работу сети, формируются на основе результатов измерений параметров сети, полученных одновременно в точках сети, разнесенных в пространстве (иногда на многие километры). Это достигается путем привязки всех измерений к одной шкале времени. Синхронизация в локальных измерительных сетях обеспечивается тактовыми сигналами высокой частоты, специализированными протоколами синхронизации NTP или PTP, секундными метками шкалы времени PPS, получаемыми от систем глобального позиционирования GPS или ГЛОНАСС.

Основным видом измерений при создании ИЭС становятся синхронизированные векторные измерения. Объектом измерений в этом случае является **фазор** – вектор в комплексной форме, описывающий гармонический сигнал, а измеряемыми величинами параметры фазора: модуль (**M**), угол сдвига фазы сигнала относительно метки времени (**φ**), частота (**F**) и скорость изменения частоты (**V<sub>f</sub>**). Наиболее важным при этом становятся измерения **φ** или его временного эквивалента с неопределенностью в доли микросекунд, поскольку далее частота и скорость ее изменения оцениваются как первая и вторая производные угла.

Новые измеряемые величины породили комплекс принципиально новых средств измерений, сосредоточенных, как правило, в узловых точках интеллектуальных сетей называемая цифровыми подстанциями (ЦП):

измерители параметров фазоров - PMU (Phasor Measurement Unit, русская аббревиатура пока отсутствует, поддерживающие стандарт IEEE C37.118.1 [9] и IEEE C37.118.2 [10];

синхронизированные АЦП (С-АЦП) переменного напряжения (тока) в поток цифровых данных, синхронизированных со шкалой времени UTC в соответствии со стандартом IEEE 1588-2008 «Протокол высокоточной синхронизации часов для сетевых измерений и управляющих систем»;

средства объединения потоков цифровых данных (MU - Merging unit) и передачи их в формате протокола IEC 61850-9-2 [11];

важнейшие элементы цифровых подстанций – цифровые электронные трансформаторы напряжения (ЦТН) и тока (ЦТТ), включая оптические, с выходными сигналами в виде синхронизированных потоков цифрового представления мгновенных значений измеряемых величин в формате протокола IEC 61850-9-2.

Законченная система передачи единиц от первичных эталонов базовых единиц электрических величин СИ, реализующим векторные измерения, и СИ ЦП, пока отсутствует. Работы в этом направлении проводятся в настоящее время в ведущих приборостроительных и метрологических центрах мира (США, Канада, Италия, Германия), где созданы первые образцы установок для калибровки векторных СИ. Необходимость метрологического обеспечения ЦП в России потребует создания новой ветви эталонной базы электроэнергетики, на основе новых специальных первичных эталонов «единиц фазоров» или, что, по нашему мнению, более перспективно, на основе модернизации первичного эталона единиц активной и реактивной электрической мощности ГЭТ 153-2012, идеология построения аппаратного и программного обеспечения которого, ориентированы на расширение функциональных возможностей.

В период 2013 - 2015 гг. на этой базе во ВНИИМ в сотрудничестве с приборостроительной фирмой НПП «Марс-Энерго» созданы, исследованы и внесены в государственный реестр СИ:

вторичный эталон единиц электрической мощности ВЭТ-МЭ 1.0, адаптированный к выполнению синхронизированных измерений;

установка поверочная векторная компарирующая УПВК-МЭ 61850, обеспечивающая поверку ЦТН и ЦТТ с выходными сигналами в формате IEC 61850-9-2.

Поверочный комплекс КЭТ-61850, созданный на базе установки УПВК-МЭ 61850, практически использован при испытаниях с целью утверждения типа оптических трансформаторов, выпускаемых фирмой «Профотек» (Москва) и сейчас находится в эксплуатации.

Необходимо отметить, что показанные результаты исследований и разработок – только первые шаги в развитии отечественной метрологии измерений в интеллектуальных электрических сетях. Они нуждаются в государственной поддержке и развитии, как минимум для того, чтобы не допустить отставания российской метрологии электроэнергетики в этой экономически важной области.

## Литература

- 1 Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 года № 1715-р
- 2 Шапиро Е.З., Белов В.С., Никитин Ю.В. и др. "Государственный эталон единицы электрической мощности", Измерительная техника №8, 1990
- 3 Гублер Г.Б., Шапиро Е.З., Никитин А.Ю. "Государственный первичный эталон единицы электрической мощности в диапазоне частот от 1 до 2500 Гц ГЭТ 153-2012", Измерительная техника №1, 2016
- 4 Гиниятуллин И.А., Гублер Г.Б., Шапиро Е.З., Никитин А.Ю. "Многофункциональный вторичный эталон единиц электрической мощности "ВЭТ-МЭ 1.0"" Сборник докладов конференции "Метрология – учет и контроль качества электрической энергии – измерения в интеллектуальных сетях", Санкт-Петербург, 2016
- 5 ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения
- 6 ГОСТ 32145-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения
- 7 ГОСТ 30804.4.30-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии
- 8 ГОСТ 30804.4.7-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств
- 9 IEEE C37.118.1 Измерения синхрофазоров в электроэнергетических сетях
- 10 IEEE C37.118.2 Синхрофазоры, передача данных в электроэнергетических сетях
- 11 IEEE1588-2008 Протокол высокоточной синхронизации часов для сетевых измерений и управляющих систем
- 12 IEC 61850-9-2:2011 на русском языке Системы автоматизации и сети связи на подстанциях. Часть 9-2.Схема особого коммуникационного сервиса (SCSM). Значения выборок по ISO/IEC 8802-3.

# РОССИЙСКИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ И ДИОДНО-ДЕТЕКТОРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ

Гуревич М.Л.<sup>1</sup>, Шевцов В.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «ФНПЦ «НИИПИ «Кварц», г. Нижний Новгород  
<sup>2</sup>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург

В метрологической практике для целей точного измерения уровня переменного напряжения широкое применение находят электротепловые и диодно-детекторные измерительные преобразователи (ИП), осуществляющие первичное преобразование этого напряжения в постоянное. Выполненные в виде защищенных электрическим и тепловым экранами малогабаритных блоков (модулей), они для завершения полного цикла измерений используются вместе с вольтметрами постоянного тока и другим вспомогательным оборудованием.

Хотя наибольшее применение модули ИП находят в составе эталонов сравнения переменного и постоянного напряжений [1] при поверке средств измерений переменного электрического напряжения (калибраторов, генераторов, вольтметров), они также используются при контроле метрологических характеристик измерительных каналов разнообразной электротехнической и радиотехнической аппаратуры, средств связи, а также для проверки амплитудно-частотных характеристик аналоговых и аналогово-цифровых изделий микроэлектроники и устройств, построенных на основе этих изделий.

В эталонах старших разрядов Государственной поверочной схемы России (ГПС) для средств измерений переменных электрических напряжений [2] в диапазоне частот от 20 Гц до 30 МГц применяются модули электротепловых ИП, которые практически нечувствительны к паразитным гармоникам испытательного сигнала и поэтому обеспечивают наивысшую точность. В диапазоне частот от 30 до 2000 МГц применяются модули диодно-детекторных ИП, которые превосходят электротепловые ИП по широкополосности, но, из-за повышенной чувствительности к гармоникам испытательного сигнала, уступают им по точности.

Большинство модулей ИП, применяемых в составе вторичных эталонов, а также в составе эталонов 1-го и 2-го разряда, такие как ИП изделий ПНТЭ-6; ПНТЭ-10; ПНТЭ-12; ПНТЭ-13; ПНТЭ-21; ВЗ-63 разработаны более 30 лет назад, выработали свой ресурс и не удовлетворяют современным метрологическим и эксплуатационным требованиям.

Основой модуля электротеплового ИП, применяемого в качестве эталона сравнения (компаратора) переменного и постоянного напряжений [3], является термоэлемент косвенного нагрева, состоящий из объединенных тепловой связью подогревателя, к которому подводится сигнал, и электронного термометра, реагирующего на приращение среднего значения  $\Delta T$  температуры подогревателя под действием мощности сигнала. Точность сравнения напряжений повышается при увеличении коэффициента электротеплового преобразования  $K_{np} = E_{вых}/P$  (типичные значения от 1 до 10 мВ/мВт), определяемого отношением выходного постоянного напряжения  $E_{вых}$  электронного термометра к величине средней мощности  $P$ , рассеиваемой сигналом на подогревателе. Наиболее часто термометром ИП является одиночная или многоэлементная термопара, а подогревателем служит проводник из нихрома.

Для идеального термоэлемента коэффициент электротеплового преобразования  $K_{np}$  является постоянной величиной, которая не зависит ни от частоты, ни от уровня воз-действующего на подогреватель сигнала, ни от его формы, ни от направления тока. Поэтому приращение среднего значения температуры  $\Delta T$  подогревателя, вызванное подачей сигнала, которое фиксируется термометром, определяется только среднеквадратическим уровнем сигнала. Одинаковому приращению температуры  $\Delta T$ , зафиксированной термометром при поочередной подаче на подогреватель напряжения сигнала и вспомогательного постоянного напряжения, называемого опорным, соответствует точное равенство среднеквадратического значения напряжения сигнала и эквивалентного по тепловому действию опорного напряжения.

Характеристики устаревших электротепловых модулей ИП заметно отличаются от идеальных. Большинство ИП используют одиночные электровакуумные термоэлементы ТВБ, содержащие подогреватель (NiCr) и термопару (Vi-Sb). Достаточно высокое значение  $K_{np}$  (около 4 мВ/мВт) здесь достигнуто за счет вакуумной конструкции и высокой температуры (100-150°C) разогрева подогревателя током сигнала. Но коэффициент преобразования  $K_{np}$  подвержен изменению во времени и под действием климатических факторов окружающей среды, причем повышенная температура разогрева проявляется в нелинейности передаточной характеристики термометра и приводит к снижению точности измерения переменного напряжения низкой частоты, период которого соизмерен с тепловой постоянной времени ИП. Кроме того, в условиях сильного разогрева подогревателя возрастает влияние температурных эффектов Томсона и Пельтье, вызывающих зависимость выходного напряжения  $E_{вых}$  ИП от направления тока через подогреватель («асимметрия»), что приводит к неоднозначности определения эквивалентного опорного

напряжения и результирующему снижению точности. Другим следствием высокой температуры является низкая устойчивость термоэлемента к перегрузкам. На повышенных частотах  $K_{np}$  не остается постоянным из-за скин-эффекта в цепи подогревателя ИП и паразитной реактивности его сопротивления, что приводит к снижению точности. Устаревшие электротепловые блоки ИП построены по пассивной схеме, имеют небольшое напряжение  $E_{вых}$  (единицы мВ), поэтому для точной фиксации этого напряжения требуется использование высокочувствительного (единицы нановольт) внешнего индикаторного вольтметра, снабженного помехоустойчивой линией связи.

Нижняя граница динамического диапазона измеряемых уровней сигнала при использовании устаревших модулей ограничивается значениями (0,3-0,5) В, при этом уменьшение уровня сигнала сопровождается существенным снижением точности.

Для ослабления сигнала повышенного уровня вместе с электротепловым блоком ИП применяются блоки добавочных сопротивлений (БДС), содержащие масштабные резисторы. БДС имеют схемно-конструктивное исполнение, которое при повышенных частотах не обеспечивает сохранение малых значений погрешности, реализуемых при сигналах небольшого уровня.

Для создания электротепловых модулей ИП, основанных на использовании новых технологий, учеными и инженерами Нижегородского научно-исследовательского приборостроительного института «Кварц» при участии специалистов-метрологов ВНИИМ им. Д.И. Менделеева был выполнен большой комплекс работ. Указанные работы завершились разработкой промышленных моделей ИП [4-11], вошедших в состав приборов В9-25; В9-14; ПНТЭ-35; ПНТЭ-36; ПНТЭ-37, которые уже применяются в метрологических службах Росстандарта и производственных предприятий.

В процессе исследований для использования в качестве основного узла ИП была разработана [12-13] технология изготовления интегральных микросхем ДТПС-1 и ДТПС-2. На рисунке 1 показана микросхема исполнения ДТПС-2. Указанные микросхемы отличаются размерами, массой и тепловой инерционностью. При этом ДТПС-1 может использоваться в диапазоне частот 2 Гц - 100 МГц при уровнях мощности до 100 мВт, а микросхема ДТПС-2 – в диапазоне частот 10 Гц - 250 МГц при уровнях мощности до 30 мВт. Эти микросхемы содержат на одной подложке два термоэлемента, каждый из которых имеет свой низкореактивный пленочный подогреватель  $R_D$  и свою многоэлементную пленочную термопару  $T$ . Высокая идентичность термоэлементов, обусловленная интегральной технологией, позволила использовать дифференциальное включение и практически устранить влияние на

точность временной и температурной нестабильности характеристик ИП. Многоэлементная (25 шт. спаев в каждом термоэлементе) структура термопар позволила за счет перераспределения тепла снизить до нескольких градусов приращение  $\Delta T$  температуры каждого спаев, существенно уменьшить неопределенность измерений, связанную с эффектами Пельтье и Томсона, и снизить нижнюю границу частотного диапазона, в несколько раз повысить устойчивость к перегрузкам.

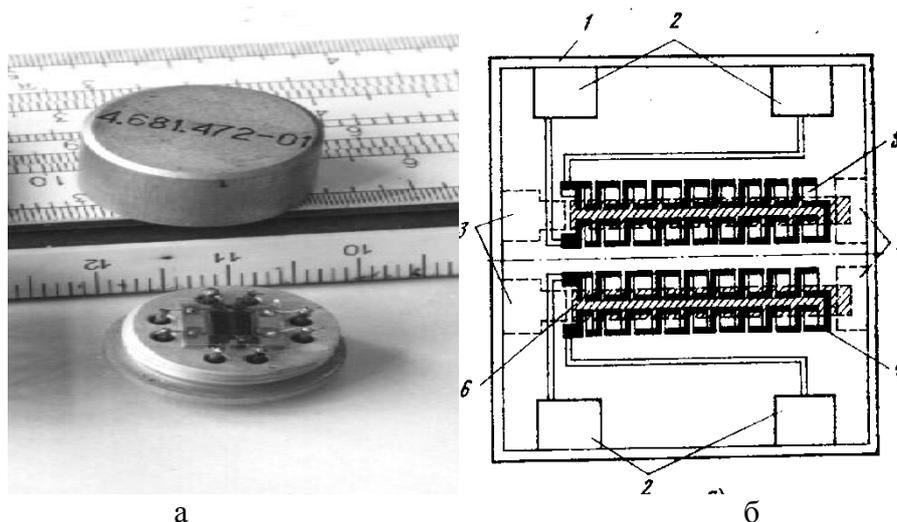


Рисунок 1. Интегральная микросхема ДТПС-2

а - внешний вид корпуса микросхемы со снятой крышкой;  
 б - идентичная пара термоэлементов на слюдяной подложке.

- 1-подложка (слюда);
- 2 – контактные площадки выводов термопар;
- 3- контактные площадки выводов подогревателей;
- 4-ветвь многоэлементной термопары с положительным потенциалом (железо);
- 5 - ветвь многоэлементной термопары с отрицательным потенциалом (теллурид свинца);
- 6-подогреватель (нихром)

Новые электротепловые модули ИП построены по активной схеме (рисунок 2), при этом термоэлементы микросхемы ДТПС вместе с прецизионным усилителем постоянного тока, построенном на операционном усилителе, снабженном встроенной схемой коррекции нуля, включены в следящую систему автоматического регулирования устройства взаимного преобразования. Обратная связь по переменному току через квадратор обеспечивает минимизацию времени переходных процессов при изменении уровня сигнала. Схема обеспечила уменьшение в 3-5 раз составляющих погрешности преобразования, обусловленных шумами, а также температурными и временными нестабильностями элементов схемы. Кроме того, увеличенное в 100-300 раз выходное напряжение позволило отказаться от использования для регистрации

выходного напряжения микросхемы  $E_{вых}$  высокочувствительных нановольтметров.

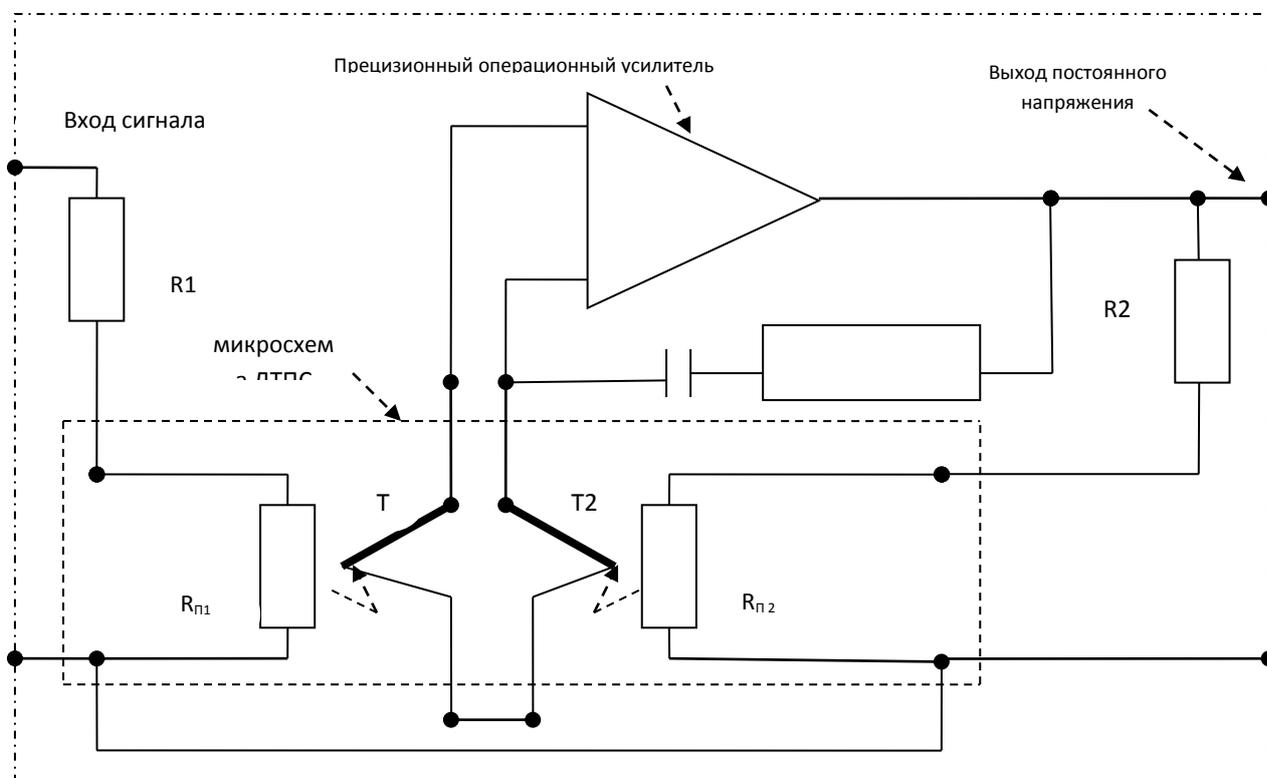


Рисунок 2. Функциональная электрическая схема ИП, построенного на микросхеме ДТПС

Для снижения нижней границы динамического диапазона измеряемых сигналов разработаны прецизионные широкополосные усилители, структурная схема которых приведена на рисунке 3. Использование прецизионных широкополосных усилителей вместе с электротепловым ИП позволило обеспечить возможность точного измерения сигналов, уровень которых составляет единицы милливольт в частотном диапазоне до 1 МГц и несколько десятков милливольт в частотном диапазоне до 10 МГц. Такие усилители построены по составной схеме и используют в своем составе широкополосный операционный усилитель, снабженный каналом стабилизации нулевого уровня.

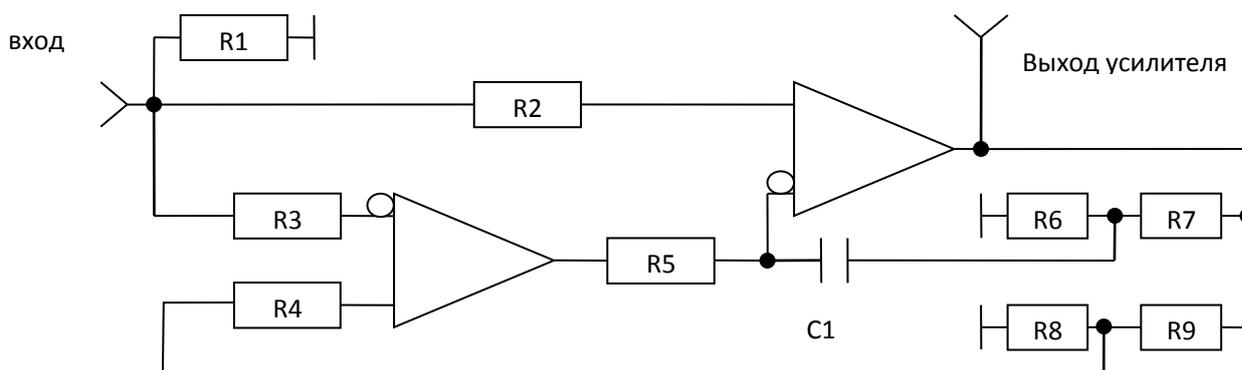


Рисунок 3. Электрическая структурная схема широкополосного усилителя, применяемого вместе с электротепловым ИП для преобразования сигналов малого уровня

Блоки БДС (рисунок 4) разработаны для использования вместе с электротепловым модулем и применяются для преобразования сигналов повышенного уровня. Сами БДС выполнены по новой технологии на прецизионных безреактивных чип-резисторах, монтируемых на теплопроводящие печатные платы, что позволило уменьшить температурные и временные нестабильности. Высокоэффективная схема коррекции обеспечила существенное уменьшение частотной погрешности.

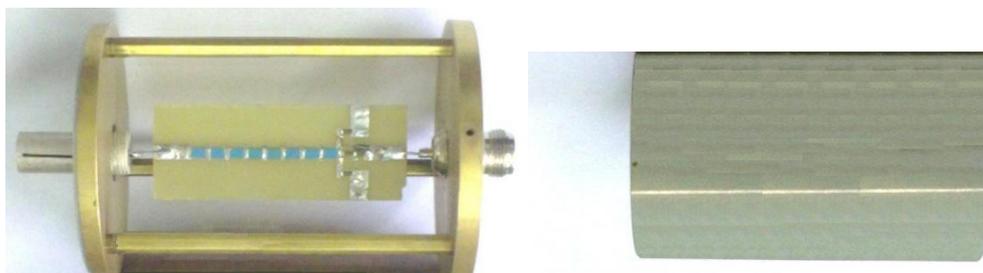


Рисунок 4. Блок БДС-1000 В (со снятой крышкой), используемый вместе с электротепловым модулем при сигналах повышенного уровня

Исследования, выполненные на Государственном первичном эталоне ГЭТ 89, [13] подтвердили, что новые ИП превосходят устаревшие модели по всем характеристикам и полностью их заменяют. Основные характеристики новых модулей термопреобразователей приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Метрологические характеристики новых модулей термопреобразователей

	Тип преобразователя				
	В9-25	В9-14	ПНТЭ-35	ПНТЭ-36	ПНТЭ-37
Разряд ГПС по ГОСТ Р 8.648	Эталон 1-го разряда	Эталон 1-го разряда	Эталон 1-го разряда	Вторичный эталон (ВЭТ)	Вторичный эталон (ВЭТ)
Диапазон напряжений, В	0,02 - 10	0,25 - 1100	0,01 - 1100	0,001 - 1100	0,3 - 33
$U_{ном}$ , В	0,2 ; 2; 10	0,5; 1; 3; 10; 30; 50; 100; 300; 500; 1000	0,01; 0,1; 0,5; 1; 3; 10; 30; 50; 100; 300; 500; 1000	0,003; 0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10; 30 ; 50; 100; 300; 500; 1000	1; 3; 10; 30
Диапазон частот, Гц	$5 - 2 \cdot 10^8$	$10 - 2 \cdot 10^8$	$10 - 200 \cdot 10^6$	$10 - 1 \cdot 10^6$	$20 - 3 \cdot 10^7$
Пределы допускаемой основной погрешности нормальной области частот, ± %					
	0,01	0,01	0,01	0,0015-0,05	0,0015 -0,05
Пределы допускаемой погрешности в поддиапазонах частоты, ± %					
5 – 10 Гц	0,15				
10 – 20 Гц	0,15	0,15	0,15	0,05 – 0,1	0,15
20 Гц – 50 кГц	0,01 – 0,02	0,01 – 0,02	0,01 – 0,02	0,0015 – 0,1	0,0015 - 0,003
50 – 100 кГц	0,01 -0,05	0,01 – 0,05	0,01 – 0,05	0,025 – 0,1	0,0015 – 0,003
0,1 – 1 МГц	0,03 – 0,1	0,03 – 0,1	0,03 – 0,1	0,01 – 0,5	0,01
1 – 10 МГц	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3	-	0,03
10 – 30 МГц	0,15	0,15	0,15		0,05
30 – 100 МГц	1,5	1,5	1,5		-
100 – 200 МГц	5	5	5		-

Комплект В9-25, внешний вид которого представлен на рисунке 5, содержит три модуля П1; П2; П3, перекрывающих диапазоны напряжений

и частот от 20 мВ до 10 В и от 10 Гц до 200 МГц соответственно. Отличительной особенностью является точное нормированное значение входного сопротивления модулей ( $50,000 \pm 0,125$ ) Ом для П1, П2 и ( $600 \pm 6$ ) Ом для П3) и точное ( $\pm 1$  %) нормированное значение коэффициента преобразования.



Рисунок 5. Внешний вид модулей комплекта В9-25

Комплект модулей преобразователей В9-14, внешний вид которого представлен на рисунке 6, поставляется вместе с измерительным блоком В9-14-00, который содержит встроенный цифровой микровольтметр и источник высокостабильного опорного напряжения двух полярностей (10 мВ - 30 В). Прибор В9-14 перекрывает диапазон частот от 20 Гц до 200 МГц и содержит 5 электротепловых модулей П1-П5 на диапазон напряжений от 0,3 до 50 В, а также 5 блоков БДС, используемых при сигналах повышенного уровня (от 40 В до 1100 В) вместе с электротепловым блоком П6. Наименьшая погрешность ( $\pm 0,01$  %) обеспечивается в нормальной области частот (от 20 Гц до 100 кГц).



Рисунок 6. Внешний вид модулей и блоков комплекта В9-14 вместе с цифровым блоком В9-14-00

По сравнению с В9-14 в комплект ПНТЭ-35, внешний вид которого представлен на рисунке 7, дополнительно включены два модуля, снабженные встроенными усилителями, и рассчитанные на малые номинальные напряжения (0,01 В и 0,1 В). Кроме того, для электротеплового модуля П7 нормированы значения погрешности в режиме сравнения сигналов тока в диапазонах частот и уровней соответственно от 20 Гц до 10 МГц и от 0,3 до 1,5 мА.

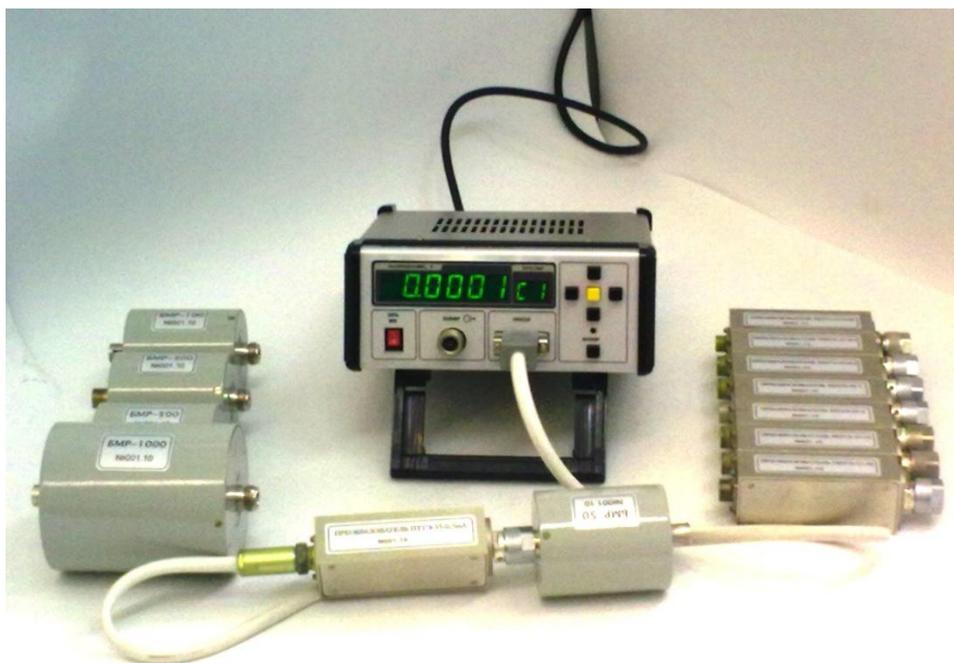


Рисунок 7. Внешний вид модулей и блоков комплекта ПНТЭ-35 вместе с цифровым блоком БИ-35

Среди вновь разработанных электротепловых модулей ИП наибольшей точностью (пределы допускаемой основной погрешности  $\pm 0,0015\%$ ) обладают модули комплектов ПНТЭ-36 (рисунок 8) и ПНТЭ-37 (рисунок 9), предназначенные для применения во вторичных эталонах переменного напряжения.



Рисунок 8. Внешний вид модулей и блоков комплекта ПНТЭ-36



Рисунок 9. Внешний вид модулей и блоков комплекта ПНТЭ-37  
в укладочном кейсе

Модули комплекта ПНТЭ-36 используются в диапазоне частот до 1 МГц при уровнях сигнала от 1 мВ до 1100 В, а модули комплекта ПНТЭ-37 – в диапазоне частот до 30 МГц при уровнях сигнала от 0,3 до 33 В.

Высокочастотные (30 МГц и выше) эталоны 1-го разряда ГПС представлены, в основном, устаревшими приборами ВЗ-49 и ВЗ-63. Эти приборы имеют в своем составе измерительный блок (БИ), снабженный выносным ИП, выполненным в виде пробника, электрическая схема которого построена на электровакуумных диодах (ЭВД), давно снятых с производства. ЭВД подвержены временному изменению характеристик и

имеют ограниченную скорость переключения, определяемую временем пролета электронов в межэлектродном пространстве диода. «Пролетная погрешность» вместе с паразитными реактивностями ЭВД, связанными с размерами конструкции, вызывают заметную частотную погрешность, величина которой различна для отдельных экземпляров ЭВД, что требует внесения в результаты измерений индивидуальных частотных поправок. Передаточная характеристика устройства, построенного на ЭВД, нелинейна, а ее крутизна зависит от параметров диода. При использовании ЭВД в эталонных преобразователях, необходимо прерывать измерения операциями калибровки и установки нуля, а также вносить существенные частотные поправки.

В высокочастотных пробниках П1 и П2 вольтметра универсального В7-83, внешний вид которого представлен на рисунке 10, являющегося эталоном нового поколения, применяются интегральные сборки идентичных диодов Шоттки (ДШ). Скорость переключения ДШ превышает скорость переключения ЭВД, а небольшие размеры обуславливают высокую резонансную частоту ИП.



Рисунок 10. Внешний вид вольтметра универсального В7-83, снабженного пробниками П1 и П2.

Это позволило существенно уменьшить частотную погрешность. Высокая идентичность ДШ позволила, используя схемотехнические приемы, достигнуть высокой линейности передаточной характеристики пробников П1 и П2 и стабильности нулевого уровня.

Наряду с диодно-детекторными ИП пробников П1 (измерительный канал №2) и П2 (измерительный канал №3), вольтметр В7-83 имеет также измерительный канал №3, использующий многодиапазонный электротепловой ИП.

При применении пробников П1 и П2 на цифровом табло измерительного блока помимо величины напряжения, отображается также величина проходящей мощности, транслируемой в 50-омных согласованных коаксиальных трактах.

Метрологические характеристики измерительных каналов вольтметра В7-83 представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Метрологические характеристики измерительных каналов при непрерывных сигналах

Характеристики	Канал №1, снабженный электротепловым ИП	Канал № 2, снабженный диодно- детекторным ИП (пробник П 1)	Канал №3 снабженный диодно- детекторным ИП (пробник П 2)
Диапазон напряжений	10 мВ –150 В на пределах $U_{п} = 0,1; 1; 10;$ 100 В	10 мВ –10 В на пределах $U_{п} = 1В; 10 В$	1 В-100 В на пределах $U_{п} = 10 В; 100 В$
Диапазон частот	5 Гц-20 МГц	10 кГц-1500 МГц	10 кГц -1000 МГц
Основная погрешность $\pm\delta_0$ (%)	0,05 при $1 < U_x / U_{п} < 1,5;$  0,05+0,01( $U_{п}/U_x-1$ ) при $0,3 < U_x / U_{п} < 1;$  0,15 ( $U_{п}/U_x$ ) при $0,3 < U_x / U_{п} < 0,1$	0,05+0,01( $U_{п}/U_x-1$ ) при $0,3 < U_x / U_{п} < 1;$  0,1+0,02( $U_{п}/U_x-1$ ) при $0,1 < U_x / U_{п} < 0,3;$	0,05+0,01( $U_{п}/U_x-1$ ) при $0,3 < U_x / U_{п} < 1;$  0,1+0,02( $U_{п}/U_x-1$ ) при $0,1 < U_x / U_{п} < 0,3$
Частотная погрешность, $\pm\delta_f$ , %	От 0,05 до 10	От 0,05 до 3	От 0,05 до 3
Диапазон проходящей мощности		10 мкВт – 2 Вт	20 мВт - 200 Вт

Таблица 3 – Метрологические характеристики измерительных каналов при импульсно-модулированных сигналах

Наименование характеристики	Значение
Диапазон среднеквадратических напряжений в импульсе	1 В – 10 В
Диапазон средней мощности в импульсе	20 мВт – 2 Вт
Диапазон несущих частот	1 МГц - 1500 МГц
Диапазон длительностей радиоимпульсов	от 0,1 до 100 мкс
Изменение показаний ( $\pm$ %) при вариациях скважности Q	
от 1 до 100	до 2
от 1 до 1000	до 4

Электрическая схема пробника П1 (рисунок 11) использует предложенный разработчиками двухканальный метод. Обладая высокой линейностью, точностью и стабильностью передаточной характеристики, пробник П1 позволяет практически с одинаковой точностью измерять, как уровни непрерывных, так и импульсно-модулированных сигналов большой скважности.

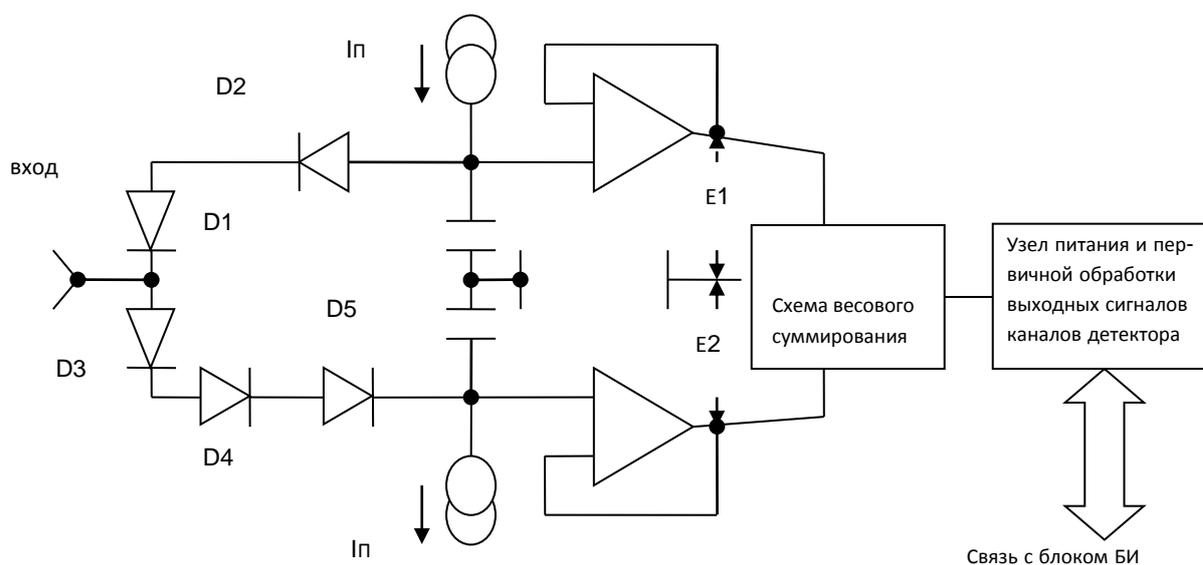


Рисунок 11. Упрощенная функциональная схема ИП выносного пробника П1 вольтметра В7-83

В электрической схеме ИП пробника П2 (рисунок 12), рассчитанного на сигналы повышенного уровня (до 100 В при частотах до 1000 МГц) применен метод параметрической линейризации передаточной характеристики с использованием во всех узлах идентичных диодов Шоттки и операционных усилителей, работающих в линейном и логарифмическом масштабе.

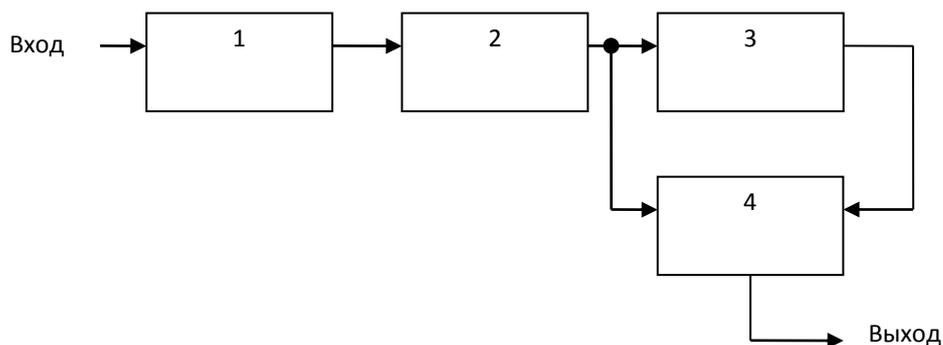


Рисунок 12. Упрощенная функциональная схема ИП выносного пробника П2 вольтметра В7-83.

- 1 – диодный амплитудный детектор СВЧ;
- 2 – корректирующее устройство на основе операционного усилителя и сборки диодов;
- 3 – логарифмический усилитель на основе операционного усилителя и сборки диодов;
- 4 – сумматор

## Выводы

1 На основе современных технологий и оригинальных схемотехнических решений разработаны, изготовлены, исследованы и опробованы:

- новые измерительные электротепловые преобразователи переменного напряжения;
- новые измерительные диодно-детекторные преобразователи переменного напряжения.

2 Указанными измерительными преобразователями оснащены изделия В9-25; В9-14; ПНТЭ-35; ПНТЭ-36; ПНТЭ-37; В7-83, предназначенные для использования в качестве эталонов старших разрядов Государственной поверочной схемы ГОСТ Р 8.648-2015 для средств измерений переменных электрических напряжений.

3 Разработанные изделия прошли исследования и апробацию на Государственном первичном эталоне [13; 17], включены в Федеральный информационный фонд обеспечения единства измерений, полностью заменяют устаревшие приборы типов ПНТЭ-6; ПНТЭ-10; ПНТЭ-12; ПНТЭ-13; ПНТЭ-14; ПНТЭ-21; В3-63 и др. и успешно используются

многими метрологическими центрами Росстандарта РФ во вторичных эталонах, а также в эталонах 1-го разряда.

## Литература

- 1 Телитченко Г.П., Шевцов В.И. Анализ метрологического обеспечения средств измерений переменного напряжения // «Главный метролог», № 5, 2003, с. 15-23.
- 2 ГОСТ Р 8.648 – 2015 Государственная система обеспечения единства измерений Государственная поверочная схема для средств измерений переменного электрического напряжения до 1000 В в диапазоне частот от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $2 \cdot 10^9$  Гц.
- 3 Гуревич М.Л., Чермохин А.В. Комплект электротепловых преобразователей В9-14 для особо точного измерения уровня сигналов переменного напряжения низких и высоких частот // «Приборы», № 10, 2007 г.
- 4 Гуревич М.Л. Новые приборы для точного измерения напряжений НЧ и ВЧ сигналов // Электроника. Наука, Технологии, Бизнес. №7, 2009 г.
- 5 Гуревич М.Л. Новые эталонные приборы для измерения переменных напряжений низких и высоких частот // Измерительная техника, № 10, 2009 г.
- 6 Гуревич М.Л. Новые измерительные приборы для оснащения метрологических электро- и радиолобораторий научно-производственных предприятий и поверочных центров // Датчики и системы, № 11, 2009 г.
- 7 Гуревич М.Л., Чермохин А.В. Термоэлектрические преобразователи и их применение в метрологических службах в качестве эталонов при поверке средств измерений и средств воспроизведения переменных напряжений и токов // Приборы, № 4, 2011 г.
- 8 Гуревич М.Л. Сравнительные характеристики измерительных термоэлектрических преобразователей напряжения, применяемых в метрологических службах в качестве эталонов при поверке калибраторов, вольтметров и других средств измерений, работающих на переменном токе // Радиоизмерения и электроника, № 18, 2012 г.
- 9 Гуревич М.Л., Горшков А.В., Кудрявцев О.А., Куракин А.В., Русейкин П.Н. Чермохин А.В. Новый комплект особо точных эталонов сравнения переменного и постоянного напряжений ПНТЭ-36 // Приборы, № 10, 2014 г.

- 10 Гуревич М.Л., Горшков А.В., Кудрявцев О.А., Куракин А.В., Русейкин П.Н.  
Черемохин А.В. Комплект модулей термоэлектрических преобразователей напряжений высшей точности // Измерительная техника, № 10, 2015 г.
- 11 Гуревич М.Л. Оценка погрешности эталона переменного напряжения // Приборы, № 5, № 6, 2014 г.
- 12 Гуревич М.Л., Русейкин П.Н. Пленочные интегральные микросхемы сдвоенных модулей термопреобразователей для электрических измерений. Нормируемые характеристики и методы их измерений // Приборы, № 5, 2016 г.
- 13 Телитченко Г.П., Шевцов В.И. Новый государственный специальный первичный эталон единицы электрического напряжения – вольта – в диапазоне частот от 10 -  $3 \cdot 10^7$  Гц // Измерительная техника, № 7, 2009 г.
- 14 Гуревич М.Л., Черемохин А.В. Новый высокочастотный цифровой вольтметр В7-83 для точного измерения уровня непрерывных и импульсно-модулированных сигналов напряжения и мощности // Приборы, № 9, 2007 г.
- 15 Гуревич М.Л. Применение высокочастотного вольтметра В7-83 для измерения уровня импульсно-модулированных СВЧ сигналов (радиоимпульсов) // Радиоизмерения и электроника, выпуск 14, 2008 г. Издание Научно-исследовательского приборостроительного института «Кварц».
- 16 Гуревич М.Л. Диодные пробники высокочастотных вольтметров. Особенности построения и характеристики // Радиоизмерения и электроника, выпуск 15, 2009 г. Издание Научно-исследовательского приборостроительного института «Кварц».
- 17 Крестовский В.В., Телитченко Г.П., Шевцов В.И. Новый государственный специальный первичный эталон единицы электрического напряжения – вольта – в диапазоне частот от  $3 \cdot 10^7$  -  $2 \cdot 10^9$  Гц // Измерительная техника, № 2, 2010 г.

# КАЛИБРОВКА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Баталов Л.А.<sup>1</sup>, Нестеров В.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФБГУ «Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова», г. Гатчина

<sup>2</sup> ООО «Магнитные приборы», Санкт-Петербург  
zlokor88@gmail.com

## 1. Введение

При решении задач с использованием средств магнитометрии часто требуется определять большое количество параметров. Это предопределило развитие многоэлементных измерительных систем, которые обеспечивают необходимую степень избыточности измерений, необходимую для определения этих параметров.

В качестве примера многодатчиковой системы можно привести магнитометр «КБД», применяющийся ПАО «Газпром нефть» для внутрубной диагностики трубопроводов (рис. 1). Магнитоизмерительная система этого прибора включает три градиентометрических преобразователя НВ0709, на концах которого размещены трехкомпонентные феррозондовые датчики индукции магнитного поля. Построение системы позволяет получать полную матрицу из девяти разностей компонент вектора индукции, отнесенных к трем пространственным направлениям:  $\Delta B_x/\Delta x$ ,  $\Delta B_x/\Delta y$ ,  $\Delta B_y/\Delta x$  и т.д. Практика показала [1] эффективность выделения особенностей трубопроводов с опорой на полную матрицу разностей перед модульными измерениями. Это показывает полезность избыточности входных данных.



Рисунок 1. Магнитометр «КБД», используемый для внутрубной диагностики подземных трубопроводов.

Другой пример системы с избыточностью – бурно развивающиеся в последнее время системы магнитного трекинга, использующиеся в практической хирургии для визуализации положения хирургического инструмента. Общий принцип таких систем следующий: имеется многокомпонентный излучатель низкочастотного магнитного поля, состоящий из нескольких (обычно 6-10) соленоидов. В течение одного периода времени ( $\sim 0.05$  с) соленоиды поочередно включаются, при этом регистрируются значения сигнала, принятого трёхкомпонентным датчиком, закрепленным на хирургическом инструменте (рис. 2). Далее по этим значениям полностью восстанавливается пространственное положение датчика: находятся три угла Эйлера и три декартовых координаты. Число принятых значений сигнала равно утроенному числу соленоидов от 18 до 30, а определению подлежат 6 параметров датчика. То есть, мы имеем дело с системой с избыточностью измерений.



Рисунок 2. Трёхкомпонентный датчик, закрепляемый на хирургическом инструменте. Длина датчика – 18 мм, диаметр – 10 мм.

Интерпретация измеренных данных включает решение обратной задачи, которое крайне чувствительно к погрешности исходных параметров. К исходным параметрам относятся не только коэффициенты передачи датчиков, но и положение их магнитных центра и магнитных осей. В таких системах применяются трёхкомпонентные датчики. Магнитные оси компонент датчиков должны быть ортогональны. Однако в процессе их изготовления неизбежно возникает погрешность ортогональности. Магнитные центры компонент оказываются расположенными друг относительно друга на некотором расстоянии, поэтому нельзя говорить об измеренных значениях индукции как измеренных в одной какой-то точке пространства. Кроме того, для компонент датчиков уместнее говорить об их эффективных магнитных центрах и эффективных магнитных осях, часто не связанных с

соответствующими геометрическими параметрами компонент датчика. Погрешность ортогональности компонент датчика и их взаимное положение необходимо учитывать при обработке данных измерений, тем более, что при большом количестве датчиков в системе погрешности могут накапливаться и сильно искажать результат.

Необходимость получения параметров взаимного положения датчиков делают затруднительным применение стандартных методов калибровки. К сожалению, даже в простейшем, дипольном приближении система уравнений на неизвестные параметры датчика или источника приводится к алгебраическим полиномиальным уравнениям степени выше 5-й, для которых не существует аналитического решения. Оценки же параметров на основе аналитических приближений также непригодны, так как обычно дают хорошую точность лишь в некоторой области пространства (как в работе [2], в которой получены разложения для составляющих поля в произвольной приосевой области обычного и биттеровского соленоидов).

Для обхода вышеупомянутых трудностей, предлагается метод калибровки многодатчиковых систем, в основе которого – решение обратной задачи магнитостатики в дипольном приближении методами численной нелинейной оптимизации на основе высокой избыточности входных данных – числа измеренных значений сигнала. Правильность нахождения параметров датчика определяется эмпирически на стенде путем контроля погрешностей в опорных точках. Точно таким же образом можно калибровать и системы с большим количеством источников магнитной индукции.

В общем виде в калибровке участвуют два набора элементов: многодатчиковая измерительная часть (измерительный набор) и многокомпонентная, содержащая много источников магнитного поля дипольного типа, излучающая часть (набор излучателей). Предлагаемая методика включает два этапа. На первом этапе определяются магнитные и геометрические параметры взаимного положения, измерительного и излучающего наборов элементов. Эти наборы в дальнейшем рассматриваются как эталонные. На втором этапе в зависимости от решаемой задачи эталонный набор излучателей используется для калибровки измерительного набора, либо эталонный измерительный набор используется для калибровки набора излучателей.

Получение информации о местоположении источника магнитного поля, а также о величине его магнитного момента и направлении его магнитной оси выполняется на основе измерений индукции в некотором числе точек. Анализ оператора, входящего в основное интегро-дифференциальное уравнение магнитостатики показывает, что с математической точки зрения обратная задача относится к классу т.н.

некорректных задач: для таких задач не выполняются условия единственности, существования и устойчивости [3]. Это утверждение остается в силе и в том случае, когда для решения магнитостатического уравнения используется простейшее приближение источника индукции магнитного поля как элементарного диполя.

Одним из подходов к решению обратной задачи магнитостатики является повышение избыточности входных данных по отношению к определяемым параметрам источника, что требует регистрации сигнала в большом количестве точек, как правило, достаточно сильно разнесенных друг относительно друга в пространстве. Задачи нахождения параметров источника по измеренной индукции возникают в задачах интерпретации данных магниторазведки в геофизике [4], во внутритрубной и бесконтактной дефектоскопии [5], в задаче позиционирования хирургического инструмента [6] для его последующей визуализации при проведении операции, в задачах компенсации помех при проведении магнитной съемки с самолета или с корабля [7].

Статья построена следующим образом: в разделе 2 описывается математически формализованная задача калибровки многодатчиковой системы, в разделе 3 описывается калибровочный стенд для применения алгоритма нелинейной оптимизации к калибровке элементов магнитного блока хирургической навигационной станции, приводится методика расчёта погрешностей, который сам по себе не является тривиальным. В разделе 4 приводятся выводы и намечаются пути дальнейшего улучшения алгоритмов.

## 2. Формулировка проблемы

В дальнейшем изложении будем все формулы записывать в глобальной системе координат (системе координат стенда)  $XYZ$ , при этом для описания пространственных положений будем пользоваться декартовыми координатами  $(x, y, z)$ , а для задания направления осей – нормированными на единицу векторами  $\mathbf{n}$ , которые параметризуются сферическими координатами  $(\theta, \varphi)$  следующим образом:

$$\vec{n} = (\cos \theta \sin \varphi, \cos \theta \cos \varphi, \sin \theta) \quad (1)$$

Трехкомпонентный магнитоизмерительный датчик характеризуется тремя компонентами, каждая из которых имеет свою ось  $\mathbf{n}_1$ ,  $\mathbf{n}_2$ ,  $\mathbf{n}_3$  и свой магнитный центр в системе координат стенда, описываемый радиус-вектором  $\mathbf{r}_1$ ,  $\mathbf{r}_2$ ,  $\mathbf{r}_3$ . Тогда если датчик помещен в объем, где действует индукция магнитного поля  $\mathbf{V}(\mathbf{r})$ , то он будет регистрировать три сигнала:  $\mathbf{n}_1\mathbf{V}(\mathbf{r}_1)$ ,  $\mathbf{n}_2\mathbf{V}(\mathbf{r}_2)$ ,  $\mathbf{n}_3\mathbf{V}(\mathbf{r}_3)$  или

$$\begin{aligned}
B_1 &= \bar{n}_1 \bar{B}(\bar{r}) \\
B_2 &= \bar{n}_2 \bar{B}(\bar{r} + \bar{r}_{12}) \\
B_3 &= \bar{n}_3 \bar{B}(\bar{r} + \bar{r}_{13})
\end{aligned}
\tag{2}$$

где  $\mathbf{r}_{12}$  и  $\mathbf{r}_{13}$  – взаимные векторы расположения компонент, подлежащие определению, а  $B_1, B_2, B_3$  – три измеренных датчиком значения сигнала. Оси датчика  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2, \mathbf{n}_3$  образуют матрицу осей датчика  $3 \times 3$ . Если бы компоненты были строго ортогональны друг другу, то данная матрица была бы ортогональной. В нашем же случае можно говорить лишь о её приближенной ортогональности. Эта матрица вместе с шестью значениями компонент векторов  $\mathbf{r}_{12}$  и  $\mathbf{r}_{13}$  полностью характеризуют датчик как таковой. В принципе, унитарным преобразованием можно преобразовать матрицу осей к более простому виду, например, добиться того, чтобы первая строка записывалась как  $(1, 0, 0)$ . Применяв это же преобразование к векторам  $\mathbf{r}_{12}$  и  $\mathbf{r}_{13}$ , мы получим параметры датчика в его собственной системе координат без привязки к стенду. Мы, тем не менее, не будем останавливаться на этой тривиальной процедуре и продолжим рассматривать параметры датчика в системе стенда.

Пусть теперь в системе имеется  $L$  источников магнитного момента, причем датчик, находящийся в точке  $\mathbf{r}$  способен принимать сигнал от каждого из  $L$  источников. Тогда мы получим  $3L$  значений сигнала с 3-х компонент датчика, причем индукция магнитного поля будет характеризоваться магнитным моментом  $i$ -го источника  $M_i$ , который войдет в виде множителя и направлением оси его магнитного момента  $\mathbf{N}_i$ :  $\mathbf{B}(\mathbf{r}) = M_i \mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})$ , где  $\mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})$  определяет форму распределения индукции от  $i$ -го источника магнитного момента в пространстве, а  $\mathbf{R}_i$  – его радиус-вектор. В этом случае имеем:

$$\begin{aligned}
B_1^{(i)} &= \bar{n}_1 M_i b(\bar{N}_i, \bar{r} - \bar{R}_i) \\
B_2^{(i)} &= K_{12} \bar{n}_1 M_i b(\bar{N}_i, \bar{r} - \bar{R}_i + \bar{r}_{12}), i = 1, 2 \dots L \\
B_3^{(i)} &= K_{13} \bar{n}_1 M_i b(\bar{N}_i, \bar{r} - \bar{R}_i + \bar{r}_{13})
\end{aligned}
\tag{3}$$

где  $B_k^{(i)}$  – сигнал с  $k$ -й компоненты датчика, возбужденный  $i$ -м источником магнитного момента. В формуле (3) учтены также взаимные коэффициенты передачи компонент датчика  $K_{12}$  и  $K_{13}$ . В дипольном приближении имеем следующий вид  $\mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})$ :

$$\bar{b}(\bar{N}_i, \bar{r}) = \frac{3(\bar{N}_i \bar{r}) \bar{r} - \bar{N}_i r^2}{4\pi r^5}
\tag{4}$$

Однако конкретный вид  $\mathbf{b}(\mathbf{N}_i, \mathbf{r})$  не ограничивает приводимые рассуждения: в работах [8] проводилась попытка учета формы катушки путем интегрирования (4) по длине катушки.

Предлагается алгоритм калибровки датчика, состоящий из двух этапов.

На **первом этапе** определяются параметры каждого из  $L$  источников магнитного момента, составляющих эталонный излучатель, а также эталонного датчика путем измерения сигналов этого датчика в  $S$  точках с известными координатами. При этом необходимо обеспечить плоско-параллельный характер перемещения датчика от одной точки к другой.

На **втором этапе** по известным параметрам эталонного излучателя индукции определяются параметры датчика, который необходимо калибровать.

Пусть имеется  $S$  точек с известными радиус-векторами  $\mathbf{r}_j, j=1,2\dots S$ . Тогда в совокупности будем иметь  $3LS$  значений сигнала, параметризуемого каждый номером точки  $j: B_k^{(i)(j)}, k=1\dots 3, i=1\dots L, j=1\dots S$ . Для определения неизвестных параметров составим целевую функцию  $W$ , являющуюся квадратом невязки между измеренными индукции и теоретическими:

$$W = \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^3 B_k^{(i)(j)} - K_{1k} \bar{n}_k M_i \bar{b} (\bar{N}_i, \bar{r}_j - \bar{R}_i + \bar{r}_{1k})^2. \quad (5)$$

Для единообразия в формуле (5) положено  $r_{11}=(0,0,0), K_{11}=1$ .

Перечислим параметры, определяющие источники магнитного момента и датчик:

Таблица 1.– Определяемые на калибровочном стенде параметры датчика и источников магнитного момента.

№	параметр
<i>i</i> -й источник магнитного момента	
1	угол оси магнитного момента $\Theta_i$
2	угол оси магнитного момента $\Phi_i$
3	величина магнитного момента $M_i$
4	X-координата радиус вектора $X_i$
5	Y-координата радиус вектора $Y_i$
6	Z-координата радиус вектора $Z_i$
датчик	
7	взаимный коэффициент передачи $K_{12}$
8	взаимный коэффициент передачи $K_{13}$
9	угол оси магнитного компоненты 1 $\theta_1$
10	угол оси магнитного компоненты 1 $\varphi_1$
11	угол оси магнитного компоненты 2 $\theta_2$
12	угол оси магнитного компоненты 2 $\varphi_2$
13	угол оси магнитного компоненты 3 $\theta_3$
14	угол оси магнитного компоненты 3 $\varphi_3$
15	X-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{12} x_{(12)}$

16	Y-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{12}$ $y_{(12)}$
17	Z-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{12}$ $z_{(12)}$
18	X-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{13}$ $x_{(13)}$
19	Y-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{13}$ $y_{(13)}$
20	Z-координата взаимного вектора $\mathbf{r}_{13}$ $z_{(13)}$

Параметры (3) и (7-8) входят в целевую функцию (5) непосредственно, параметры (15-17) и (18-20) – через параметризацию взаимных векторов между компонентами  $\mathbf{r}_{12}$  и  $\mathbf{r}_{13}$  соответственно. Параметры (9-10), (11-12) и (13-14) параметризуют оси датчика согласно формуле (1), параметры (1-2) параметризуют ось  $i$ -го источника согласно формуле (1).

На первом этапе, таким образом, нам необходимо определить все параметры (1-20) из таблицы (1), а на втором этапе только параметры (7-20). Поэтому в первом случае избыточность равна  $3LS-6L$ , а во втором  $3LS-14$ , то есть в обоих случаях растет линейно с числом точек измерения.

Контроль правильности найденных параметров можно проводить, измеряя координаты опорных точек и анализируя взаимные расстояния между ними (подробнее в разделе 3). В этом случае датчик описывается тремя углами Эйлера, которые параметризуют матрицу поворота  $U$  и тремя координатами, составляющими радиус-вектор датчика  $\mathbf{r}$ , то есть шестью параметрами. Данные параметры ищутся при регистрации  $3L$  значений поля от источников, то есть избыточность равна  $3L-6$ . Целевая функция имеет вид, похожий на (5), но в предположении известных параметров (1-20) из табл. 1:

$$W = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^3 B_k^{(i)} - K_{1k} U \vec{n}_k M_i \vec{b} (\vec{N}_i, U(\vec{r} - \vec{R}_i) + \vec{r}_k)^2. \quad (6)$$

Минимизация целевой функции (5) и (6) проводится методами нелинейной оптимизации, для которых в последнее время появилось много программных реализаций. Как правило, для подобных задач используется LM-алгоритм (Левенберга-Марккрайфда) как одна из реализаций нелинейного метода наименьших квадратов. Этот алгоритм удобен своей нечувствительностью к начальному приближению. В нашем случае, однако, в условиях большого числа определяемых параметров, численная процедура может не сойтись к корректным значениям из-за плохо подобранных начальных приближений. Сформулируем ряд условий для начальных приближений в случае калибровки по точкам на плоскости, рассматриваемой подробно в следующем разделе.



Рисунок 3 Расположение трехкомпонентного датчика на калибровочном стенде.

На рис. 3 изображен датчик с компонентами 1, 2, 3 на плоскости калибровочного стенда. Система координат стенда выбрана таким образом, что оси  $X$  и  $Y$  находятся в плоскости стенда, а ось  $Z$  направлена перпендикулярно им. Датчик расположен так, что ось компоненты 3 приближенно коллинеарна оси  $Z$  системы координат стенда.

Для правильного определения параметров источников магнитного момента необходимо в качестве начальных приближений для их радиус-векторов задать характерное расстояние до стенда, например, высоту  $H$  плоскости над излучателем (рис. 3). То есть, начальные радиус-векторы источников магнитного момента можно брать в виде  $\mathbf{R}_i^{(0)} = (0, 0, H)$ . Также необходимо задать все мультипликативные величины, входящие в формулу (5) и таблицу 1: для взаимных коэффициентов передачи берем  $K_{12}^{(0)} = 1$ ,  $K_{21}^{(0)} = 1$ . Магнитные моменты источников индукции также необходимо задать заранее, желательно предварительно измерить их каким-либо независимым способом. Для осей компонент 1 и 2 вертикальная составляющая равна нулю, поэтому согласно формуле (1) можно брать начальные приближения  $\theta_1^{(0)} = 0$ ,  $\varphi_1^{(0)} = 0$ ,  $\theta_2^{(0)} = 0$ ,  $\varphi_2^{(0)} = 0$ . Для компоненты (3) брать приближение в виде  $\theta_3^{(0)} = \pi/2$  неудобно, так как в окрестности этой точки нет обратимости синуса, что приводит к дополнительной неустойчивости численной процедуры. Удобнее для 3-й компоненты использовать параметризацию, отличную от (1):

$$\vec{n}_3 = (\sin \theta_3 \sin \varphi_3, \sin \theta_3 \cos \varphi_3, \cos \theta_3) \quad (7)$$

с начальным приближением  $\theta_3^{(0)}=0$ ,  $\varphi_3^{(0)}=0$ .

### 3. Описание калибровочного стенда и расчет погрешностей

В данном разделе описывается применение алгоритма, описанного в разделе 2, для калибровки трехкомпонентных датчиков магнитного блока хирургической навигационной станции. Стенд представляет стол, на поверхность которого нанесены метки 36 опорных точек, образующих координатную сетку. Расстояние между соседними точками 140 мм (рис. 4). Погрешность нанесения метки 0.1 мм. Под столом на расстоянии 200 мм от его поверхности, установлен многокомпонентный излучатель, содержащий 6 катушек. Корпус излучателя в плане представляет равносторонний треугольник со стороной 150 мм (рис. 5). Рабочая зона представляет сферу диаметром 600 мм, центр которой расположен на удалении 450 мм от поверхности многокомпонентного излучателя (рис. 5).



Рисунок 4. Калибровочный стенд с нанесенными метками опорных точек.

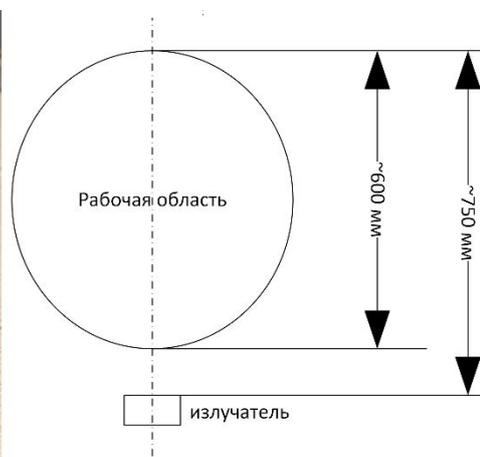


Рисунок 5. Вид многокомпонентного излучателя. Справа приведено положение рабочей зоны относительно излучателя.

Процесс калибровки состоит в последовательном плоско-параллельном перемещении и фиксации трехкомпонентного датчика в каждой из 36 опорных точек плоскости. Датчик в процессе перемещения движется вдоль образующих, не поворачиваясь, что позволяет удерживать во всех слагаемых суммы (5) одинаковые элементы матрицы осей компонент датчика. В каждой точке сигнал усредняется по 100 отсчетам для минимизации влияния шумов и затем сохраняется в память компьютера стенда.

Минимизация целевой функции (5) позволяет находить параметры (1-20). Ниже представлен пример таблицы с найденными параметрами датчика в системе координат стенда.

Таблица 2. – Пример определения параметров датчика в системе координат стенда.

параметр	значение
Взаимный коэффициент передачи K12	0.959129
Взаимный коэффициент передачи K13	0.98735
Взаимный вектор r12	(-3.6425,0.348757,-1.76089)
Взаимный вектор r13	(-2.70222,-0.257374,-8.87094)
Матрица осей компонент	$\begin{pmatrix} 0.998627 & -0.0450407 & -0.0267535 \\ 0.0798024 & 0.99667 & 0.0173517 \\ -0.0597426 & 0.00551627 & -0.998199 \end{pmatrix}$

Из таблицы 2 видно, что магнитные центры компонент датчика отнесены на расстояния в несколько миллиметров, что необходимо учитывать при анализе измерений. Также видно, что матрица осей компонент близка к единичной, но всё же имеются отличия, также влияющие на погрешность измерений и подлежащие учету.

Найденные параметры можно подставить в формулу (6) для последующего измерения координат опорных точек минимизацией выражения (5). При этом по погрешности определения координат в опорных точках можно судить о погрешности результатов калибровки.

На этапе контроля погрешности предлагаемого алгоритма возникает проблема корректного анализа погрешностей, возникающих в задаче магнитного позиционирования. Малость погрешностей в определении координат опорных точек при положении излучателя таком же, как при калибровке, ещё не гарантирует малости погрешностей при другом положении излучателя или в других точках внутри рабочей области. Это означает, что необходима методика контроля погрешности калибровочных параметров, не зависящая от положения излучателя. Очевидно, что в

случае точно найденных параметров наборы измерений на множестве опорных точек будут одинаковыми с точностью до сдвига и пространственного поворота излучателя: если  $\{r_j\}^{(1)}$  – один набор координат опорных точек, а  $\{r_j\}^{(2)}$  – второй при другом положении излучателя, то всегда найдутся такая матрица поворота  $U_{12}$  и вектор смещения  $R_{12}$ , что для любой опорной точки

$$r_j^{(1)} = U_{12}r_j^{(2)} + R_{12}, j = 1 \dots S. \quad (7)$$

Матрица поворота  $U_{12}$  и вектор смещения  $R_{12}$  при этом не зависят от номера точки  $j$ . Найти их можно также методами нелинейной оптимизации, разновидностью которого является алгоритм ближайших точек (ICP - алгоритм). В нашем случае исходный набор опорных точек лежит на плоскости и их координаты задаются как

$$r_j = (l(p-1), l(q-1), 0), l = 140, p = 1 \dots 6, q = 1 \dots 6. \quad (8)$$

В случае, когда координаты опорных точек найдены с погрешностями, алгоритм ближайших точек не сможет точно совместить два набора измерений и для каждой опорной точки с измеренными координатами  $\mathbf{r}_j = (x_j, y_j, z_j)$  можно определить вектор погрешностей

$$\Delta r_j = (\Delta x_j, \Delta y_j, \Delta z_j) = (\tilde{x}_j - l(p-1), \tilde{y}_j - l(q-1), \tilde{z}_j), l = 140, p = 1 \dots 6, q = 1 \dots 6 \quad (9)$$

Предлагается также производить расчет погрешностей (9) в двух плоскостях: когда плоскость корпуса излучателя параллельна плоскости опорных точек и когда она перпендикулярна ей. Такая методика позволяет равномерно покрыть измерениями координат всю рабочую область. При этом в каждой из опорных точек координаты усредняются по 1000 отсчетам и рассчитывается СКО – среднеквадратичное отклонение от среднего значения координат, оно дает представление о влиянии случайной составляющей сигнала на качество калибровки.

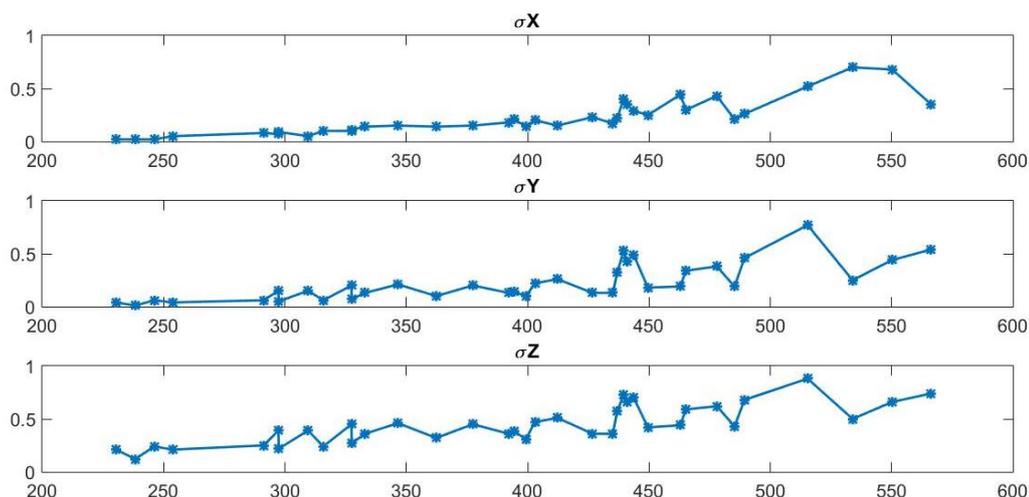


Рисунок 6. Графики СКО координат опорных точек в зависимости от расстояния до центра излучателя.

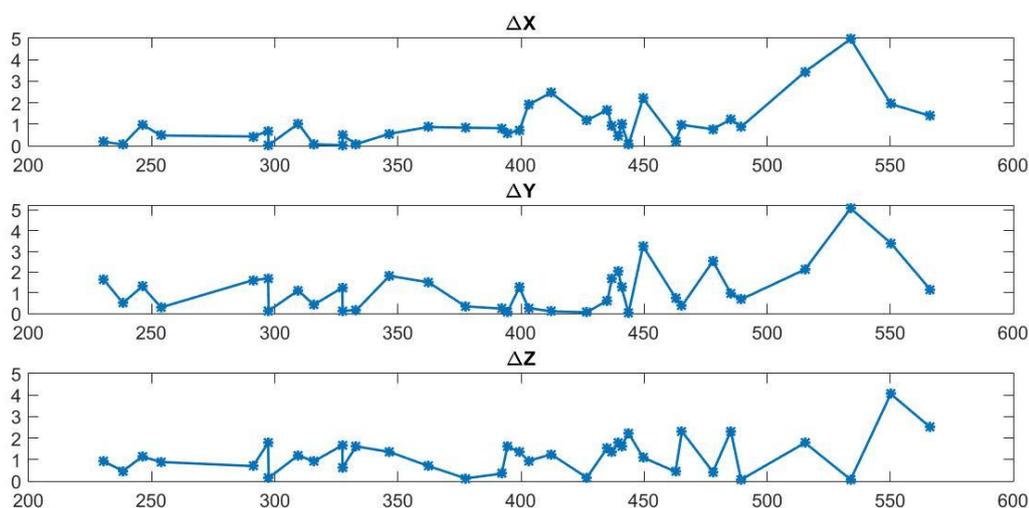


Рисунок 7. Графики погрешностей определения координат опорных точек в зависимости от расстояния до центра излучателя.

На рисунках 6 и 7 приведены графики СКО координат опорных точек и погрешностей определения координат опорных точек в зависимости от расстояния до центра излучателя. Характер полученных кривых и величины погрешностей совпадают с аналогичными данными в известных нам опубликованных работах [9]. Видно, что во всей рабочей зоне СКО не превышает 1 мм, а на расстоянии, меньшем 400 мм до центра излучателя, не превышает 0.5 мм, что говорит о малом влиянии шумов в этой области. Модуль погрешности позиционирования на расстоянии, меньшем 400 мм, не превышает 2 мм, а начиная с 450 мм, начинает резко расти по всем трем координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Данная проблема, по-видимому, связана с недостаточной точностью в определении параметров датчика и

источников магнитного момента или влиянием искажающих факторов на сигнал. Тем не менее, можно сделать важный вывод о том, что описанная процедура калибровки датчика позволяет успешно решать задачу позиционирования в магнитном поле излучателя.

#### **4. Заключение**

В настоящей работе предложена методика калибровки многодатчиковых систем. По результатам апробации этой методики можно сделать следующие выводы:

1. Показана возможность решения обратной задачи магнитостатики в дипольном приближении в условиях избыточности входных данных относительно числа определяемых параметров датчика. В число этих параметров входят, помимо коэффициентов передачи компонент датчиков, его геометрические параметры их взаимного положения. Строгое обоснование данного подхода и определение условий устойчивости численной процедуры требует, тем не менее, более тщательного анализа целевых функций (5) и (6).

2. Предложена методика калибровки трехкомпонентного датчика индукции в магнитном поле многокомпонентного излучателя, использующая результаты измерения датчиком индукции магнитного поля при его последовательном перемещении по набору опорных точек с априори известными координатами. Методика может быть обобщена на различные многодатчиковые (многоэлементные) измерительные системы, например, градиентометрические.

3. Предложена методика расчета погрешностей в рабочей зоне излучателя стенда для контроля погрешности найденных параметров датчика. При анализе погрешностей также используются методы нелинейной оптимизации для определения координат опорных точек на основе найденных ранее параметров датчика. Выявлено, что погрешность в определении координат зависит от единственного параметра – расстояния до центра излучателя, зависимостью от остальных параметров можно пренебречь. Требуется дальнейшее изучение связи между пространственным распределением погрешностей определения координат опорных точек и погрешностей параметров датчика.

4. Предложенная методика была успешно применена к задаче навигации хирургического инструмента [5], приведены параметры соответствующего калибровочного стенда и сделана оценка погрешностей позиционирования в поле излучателя. Возможны и другие приложения предлагаемой методики.

## Литература

- 1 Г.Л. Максимов, Ф.В. Носов, А.Д. Фогель, В.В. Семенов, А.А. Елисеев. Комплексная диагностика технического состояния трубопроводов. Коррозия Территории Нефтегаз № 2 (37) 2017.
- 2 В.Н. Канунников, И.И. Логачев. Аналитические расчеты полей в системах фокусировки из биттеровских соленоидов., Журнал технической физики, Том 60, вып. 1, 1990,с.15-20.
- 3 А.Н.Печенков, В.Е.Щербинин. Некоторые прямые и обратные задачи технической магнитостатики., Екатеринбург, УрО РАН, 2004, 177с.
- 4 Трошков Г.А., Грознова А.А. Математические методы интерпретации магнитных аномалий, Москва, Недра, 1985, 151с.
- 5 А.Н.Печенков. Численное моделирование обратной задачи магнитоста-тической дефектоскопии., Дефектоскопия, 11,2005,с.25-30.
- 6 Alfred M. Franz, Tam´as Haidegger, Wolfgang Birkfellner, Kevin Cleary, Terry M. Peters and Lena Maier-Hein. Electromagnetic Tracking in Medicine – a Review of Technology, Validation and Applications. IEEE Transactions on Medical Imaging, May 2014, doi: 10.1109/TMI.2014.2321777
- 7 Семевский Р.Б., Аверкиев В.В., Яроцкий В.А. Специальная магнитометрия. СПб: Наука, 2002. 228 с, 78 ил.
- 8 Tobias Schroeder. An accurate magnetic field solution for medical electromagnetic tracking coils at close range - Journal of Applied Physics 117, 224504 (2015).
- 9 Mengfei Li, Tomasz Bien, Georg Rose. FPGA based electromagnetic tracking system for fast catheter navigation - International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 9, September 2013.

## НОВЫЙ ФОРМИРОВАТЕЛЬ СИГНАЛА «ПЕТЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА» ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Львов А.А.<sup>1</sup>, Львов П.А.<sup>2</sup>, Кузин С.А.<sup>2</sup>, Соколов Д.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.*

<sup>2</sup> *Энгельское ОКБ «Сигнал» имени А.И. Глухарева*

alvova@mail.ru

Приоритетная проблема современной концепции развития техники высоких технологий – повышение эффективности автоматических или автоматизированных цифровых систем управления и качественного мониторинга состояния данных систем. Решение большинства задач в рамках этой проблемы требует разработки высокоточных и надежных источников первичной информации – датчиков. Одним из важнейших требований к ним является неизменность их метрологических характеристик в течение всего срока службы при высокой устойчивости к внешним воздействиям.

В настоящее время в качестве формирователей сигналов датчиков, как правило, используются мостовые схемы [1], которые стали стандартом построения формирователей сигналов для абсолютного большинства параметрических датчиков. Проблемы таких формирователей достаточно подробно рассмотрены в работах отечественных и зарубежных исследователей [2,3]. Их основными преимуществами являются простота конструкции и высокая точность измерений. Однако мостовым схемам присущи и некоторые существенные недостатки [2,5]: 1) нелинейность передаточной функции моста; 2) зависимость достигаемой точности измерений от длины соединительных проводов (например, при дистанционных измерениях); 3) зависимость от помех, наводимых в этих проводах; 4) недостаточная стабильность выходной характеристики мостовой схемы во времени. Высокоточные же версии этих формирователей представляют собой дорогостоящие и громоздкие устройства.

Отмеченных недостатков лишена оригинальная схема формирователя сигнала, основанная на петле постоянного тока, впервые предложенная К.Ф. Андерсоном [2] для резистивных датчиков температуры. В настоящей работе рассматривается использование универсального вторичного преобразователя на основе петли переменного тока для параметрических датчиков с чисто резистивным, емкостным, индуктивным и смешанным типами импедансов.

Предлагаемая структурная схема формирователя показана на рис. 1.

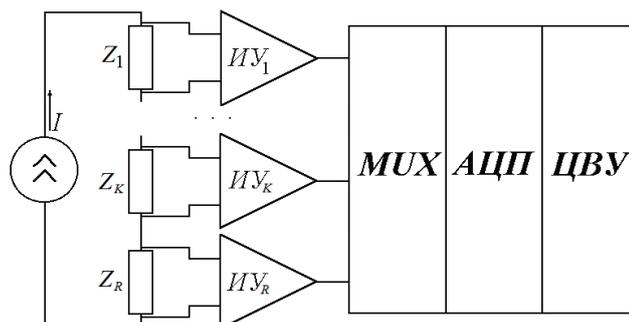


Рисунок 1. Схема «токовой петли»:

$I$  – генератор тока;  $Z_1, \dots, Z_K$  – импедансы чувствительных элементов датчиков;  $Z_R$  – импеданс опорного датчика;  $ИУ$  – измерительный усилитель;  $MUX$  – мультиплексор;  $АЦП$  – аналого-цифровой преобразователь;  $ЦВУ$  – центральное вычислительное устройство.

В петлю, питаемую генератором тока  $I$ , включаются несколько чувствительных элементов (ЧЭ) параметрических датчиков с собственными импедансами  $Z_i$ , на которые действуют измеряемые величины, и один опорный датчик с импедансом  $Z_R$ , подверженный воздействию всех внешних возмущающих факторов, что и ЧЭ измерительных, но на который не действуют измеряемые величины. Напряжения, снимаемые с ЧЭ и опорного датчика, усиливаются с помощью измерительных усилителей, оцифровываются в АЦП и вводятся в память ЦВУ, в роли которого выступает микропроцессор, где вся последующая обработка ведется в цифровом виде.

В работах [2, 6] показано, что оцифрованные напряжения с выходов ЧЭ датчиков практически не зависят от сопротивлений соединительных проводов (питающих и измерительных) и возможных помех, наводимых в них. Более того, отслеживая изменения импеданса опорного датчика, вызванные влиянием факторов окружающей среды, можно учесть и компенсировать их влияние на показания измерительных ЧЭ, что позволяет отстроиться от многих источников систематических погрешностей датчиков (неопределенностей типа В).

Для снижения стоимости измерительной системы в целом не используется высокостабильный генератор тока и прецизионные измерительные усилители. Предполагается, что в течение одного цикла измерения выходных сигналов ЧЭ датчиков частота генератора и смещение нуля измерительных усилителей остаются постоянными, но их значения точно неизвестны. Поэтому математическая модель сигналов, снимаемых с ЧЭ и опорного датчика, представляется следующей системой уравнений [5]:

$$u_{kj} = A_k \sin[2\pi(f_0 + \nu)t_{kj} + \varphi_k] + B_k + \xi_{kj}, \quad k=1, 2, \dots, K, R; j=1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где:  $A_k$  и  $\varphi_k$  – неизвестные амплитуда и фаза сигнала с выхода  $k$ -го ЧЭ, подлежащие оценке;  $\nu$  – малая неизвестная флуктуация центральной частоты  $f_0$  источника переменного тока, возникающая из-за его нестабильности;  $B_i$  – постоянное смещение, необходимое для того, чтобы оцифровываемый сигнал в АЦП был положительным, но неизвестное из-за возможного «дрейфа нуля» измерительного усилителя;  $\xi_{kj}$  – случайная погрешность измерения напряжения в  $k$ -м канале в момент времени  $t_{kj}$ , возникающая из-за влияния тепловых шумов усилителей и других факторов и предполагаемая нормально распределенной с нулевым математическим ожиданием и неизвестной дисперсией. Величина  $\nu$  считается очень малой по сравнению с  $f_0$  ( $|\nu/f_0| \leq 0,01$ ). При этом моменты взятия выборок в разных каналах  $t_{kj}$  и  $t_{mj}$  не равны между собой для различных каналов ( $k \neq m$ ).

При сделанных допущениях система уравнений (1) должна быть решена относительно параметров  $A_k$ ,  $\varphi_k$ ,  $B_k$  и  $\nu$ . Всего в ней  $3K+1$  неизвестных.

Если общее время измерений не превышает 2-3 периодов тока, питающего петлю, то величина  $\nu N\tau \leq 0,15$  (где  $\tau = t_{kj} - t_{k(j-1)}$  – период дискретизации сигналов в АЦП). В этом случае синус и косинус малого аргумента  $\nu t_{kj}$  могут быть приближенно равны:  $\sin \nu t_{kj} \approx \nu t_{kj}$  и  $\cos \nu t_{kj} \approx 1$ . Тогда после раскрытия скобок (1) может быть переписана:

$$u_{kj} \approx A_k \sin(2\pi f_0 t_{kj}) \cdot \cos \varphi_k + A_k 2\pi \nu t_{kj} \cos(2\pi f_0 t_{kj}) \cdot \cos \varphi_k + A_k \cos(2\pi f_0 t_{kj}) \sin \varphi_k - A_k 2\pi \nu t_{kj} \sin(2\pi f_0 t_{kj}) \cdot \cos \varphi_k + B_k + \xi_{kj}, \quad k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N; \quad (2)$$

Следующая замена переменных

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{1k} = A_k \cos \varphi_k, \\ q_{2k} = A_k \nu \cos \varphi_k, \\ q_{3k} = A_k \sin \varphi_k, \\ q_{4k} = A_k \nu \sin \varphi_k, \\ q_{5k} = B_k, \end{array} \right. \text{ и } \left\{ \begin{array}{l} x_{1kj} = \sin 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{2kj} = 2\pi \nu t_{kj} \cos 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{3kj} = \cos 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{4kj} = -2\pi \nu t_{kj} \sin 2\pi f_0 t_{kj}, \\ x_{5kj} = 1; \end{array} \right. \quad k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, M; \quad (3)$$

делает систему (2) линейной относительно новых неизвестных

$\mathbf{q} = (q_{11}, \dots, q_{51}, \dots, q_{1K}, \dots, q_{5K})^T$  ( $T$  обозначает транспонирование матрицы).

$$u_{kj} = \sum_{m=1}^5 q_{mk} x_{mkj} + \xi_{kj}, \quad k=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

Как следует из (3) и (4), общее число неизвестных  $q_{mk}$  равно  $5K$ . Следовательно, число измерений напряжения в каждом канале должно быть не меньше этой величины, но для повышения точности оценивания желательно выбрать  $M$  в несколько раз большим, чем  $5K$ .

С математической точки зрения должны существовать  $2K-1$  билинейных уравнений связи на эти переменные  $q_{mk}$ , которые легко находятся из (3)

$$q_{1k}q_{4k} = q_{2k}q_{3k}; \quad v = q_{2k}/q_{1k}; \quad k=1,2,\dots,K. \quad (5)$$

На самом деле можно найти много уравнений связи для переменных  $q_{mk}$ , но только  $2K-1$  из них будут независимыми. Поэтому выбраны именно соотношения (5).

При сделанных допущениях относительно погрешностей измерения  $\xi_{kj}$  оптимальные оценки неизвестных параметров  $q$  могут быть получены путем решения линейной системы уравнений (4) по методу максимального правдоподобия (ММП) [5,6] с учетом билинейных ограничений (5).

Стандартный метод решения, предложенный в [7], позволяет предложить итерационный алгоритм решения задачи (4), (5). На первом этапе решения ограничения (5) не учитываются, и линейная система (4) решается по ММП. В этом случае решение, которое выбирается в качестве нулевого приближения, совпадает с решением по методу наименьших квадратов (МНК):

$$q_0 = (X^T X)^{-1} X^T V, \quad (6)$$

где  $^{-1}$  обозначает нахождение обратной матрицы. После этого задача (4), (5) может быть решена с помощью метода множителей Лагранжа [5,8]:

$$q_{m+1} = q_m - \frac{q_m^T G q_m}{2q_m^T G (X^T X)^{-1} G q_m} (X^T X)^{-1} G^T q_m, \quad (7)$$

где  $m$  – порядковый номер итерации, а блочные матрицы  $X$  и  $G$  задаются следующими выражениями:

$$X = \begin{pmatrix} W_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{K+1} \end{pmatrix}; \quad G = \begin{pmatrix} H & G_{12} & G_{13} & G_{14} & G_{15} \\ G_{21} & H & 0 & 0 & 0 \\ G_{31} & 0 & H & 0 & 0 \\ G_{41} & 0 & 0 & H & 0 \\ G_{51} & 0 & 0 & 0 & H \end{pmatrix}; \quad W_k = \begin{pmatrix} x_{11k} & x_{21k} & x_{31k} & x_{41k} & x_{51k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{1Mk} & x_{2Mk} & x_{3Mk} & x_{4Mk} & x_{5Mk} \end{pmatrix};$$

$$G_{12} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad G_{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad G_{14} = \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & -1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}; \quad G_{13} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix};$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad G_{31} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}; \quad G_{41} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \dots \end{pmatrix}; \quad G_{15} = \begin{pmatrix} -1 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix};$$

$$G_{51} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 1 & 0 & \dots \end{pmatrix}.$$

Все матрицы  $G_{ln}$  имеют одинаковые размеры ( $5 \times 5$ ), причем каждая из них содержит только по два ненулевых элемента. Все непоказанные элементы этих матриц равны нулю.

Как указано в работе [8], сходимость предлагаемого алгоритма очень высокая (как правило, не требуется более 2-3 итераций). После нахождения оценок промежуточных неизвестных  $q$  несложно вычислить оценки искомых параметров модели (1), подставив значения этих оценок в (3):

$$\hat{v} = \frac{1}{2K} \sum_{k=1}^K \begin{pmatrix} \hat{q}_{2k} + \hat{q}_{4k} \\ \hat{q}_{1k} \quad \hat{q}_{3k} \end{pmatrix}, \quad \hat{A}_k = \sqrt{\hat{q}_{1k}^2 + \hat{q}_{3k}^2}, \quad \hat{\phi}_k = \begin{cases} \alpha_k, & \hat{q}_{1k} \geq 0, \hat{q}_{3k} \geq 0; \\ \alpha_k + \pi, & \hat{q}_{1k} < 0; \\ \alpha_k + 2\pi, & \hat{q}_{1k} > 0, \hat{q}_{3k} < 0, \end{cases},$$

$$0 \leq \hat{\phi}_k \leq 2\pi, \quad \alpha_k = \arctg(\hat{q}_{3k} / \hat{q}_{1k}) \quad (8)$$

Зная из (8) оценки амплитуд и фаз сигналов с выходов всех датчиков, можно определить значения физических величин, для измерения которых используется ЧЭ.

Применение предлагаемого формирователя сигналов в сочетании с описанной процедурой оценивания параметров датчиков позволяет существенно снизить требования к идентичности используемых ЧЭ в токовой петле (что является обязательным для мостовых формирователей сигнала). Таким образом, стоимость системы датчиков, используемых для сбора информации с какого-либо объекта, может быть значительно снижена.

Помимо этого, процедура решения системы получающихся уравнений (6), (7) будет существенно упрощена, если использовать методы оптимального планирования эксперимента. Действительно, точность измерения и вычислительная сложность решения во многом определяются матрицей  $X^T X$ , обращение которой является трудоемкой задачей, если число ЧЭ в петле  $M$  достаточно велико. Однако в случае правильного планирования эксперимента, заключающегося в подборе соотношения между частотой генератора тока и частотой дискретизации сигналов в АЦП, можно существенно упростить вид этой матрицы. Для этого необходимо, чтобы частота АЦП была в целое число раз больше частоты генератора тока. В работе [9] показано, что при таком выборе частот столбцы матрицы планирования эксперимента  $X$  становятся ортогональными, а матрица  $X^T X$  – диагональной, что значительно упрощает все расчеты по формулам (6) и (7), которые можно проводить, используя специализированный микропроцессор, обладающий ограниченными вычислительными ресурсами, что еще более упрощает и удешевляет аппаратуру измерителя.

Теперь рассмотрим примеры использования предлагаемого формирователя сигналов для измерения давления. Повышение тактико-

технических характеристик авиационной техники требует её оснащения интеллектуальными датчиками давления, для управления и контроля, обладающих погрешностью не более 0,25 % от верхнего предела измерений, надежностью не менее 300000 часов наработки на отказ при работе в условиях от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$ . Таким требованиям в наибольшей степени отвечают малогабаритные датчики давления нового поколения, разработанные ЭОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева (г. Энгельс, Саратовской обл.), которые в 1,5–2 раза дешевле зарубежных аналогов и не уступают им по точности измерений.

Предлагаемый формирователь сигналов использовался при разработке датчиков давления пьезорезистивного и емкостного типов.

В датчиках первого типа традиционно четыре ЧЭ – пьезорезистора включаются в плечи мостовой схемы, причем резисторы в противоположных плечах ориентированы так, чтобы одна пара увеличивала сопротивления, а другая – уменьшала, при воздействии измеряемого давления. Сигнал рассогласования мостовой схемы подается на схему обработки.

Предлагаемая авторами топология измерительной схемы полностью совпадает с изображенной на рис. 1, когда все пьезорезисторы включаются последовательно в токовую петлю ( $M = 4$ ). Алгоритм обработки снимаемых с них напряжений задается выражениями (6)–(8). Поскольку сопротивления пьезорезисторов считаются чисто активными, то интерес представляют только амплитуды напряжений  $A_1, \dots, A_4, A_R$ .

В емкостных датчиках абсолютного давления структурная схема несколько видоизменяется (рис. 2). В этой схеме используется измерительный емкостный датчик, включенный в токовую петлю последовательно с опорной емкостью  $C_0$ . Измерительный датчик представляет собой преобразователь «измеряемое давление – емкость», а опорная емкость конструктивно расположена в непосредственной близости к измерительной емкости, причем при отсутствии внешнего давления обе емкости имеют примерно одинаковые параметры. Токовая петля питается генератором  $G$ , формирующим переменный синусоидальный ток постоянной амплитуды. Математическая модель напряжений, снимаемых с обеих емкостей, совпадает с (1)–(5). В ней ( $M = 1$ ), а импедансы измерительного и опорного ЧЭ равны соответственно:

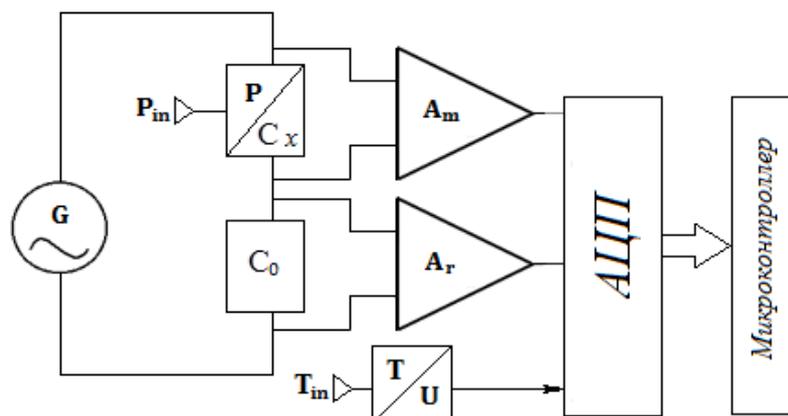


Рисунок 2. Структурная схема формирователя сигнала емкостного датчика абсолютного давления:

$P_{in}$  – измеряемое давление;  $T_{in}$  – температура окружающей среды;  
 $P/C_x$  – преобразователь типа «давление–емкость»;  
 $C_0$  – опорная емкость;  
 $A_m, A_r$  – операционные усилители измерительного и опорного каналов, соответственно;  $T/U$  – преобразователь «температура–напряжение»;  
 АЦП – аналого-цифровой преобразователь с мультиплексором

$$Z_x = R_x + jX_{C_x} = A_x \cos \varphi_x + jA_x \sin \varphi_x,$$

$$Z_0 = R_0 + jX_{C_0} = A_0 \cos \varphi_0 + jA_0 \sin \varphi_0, \quad (9)$$

где реактивная составляющая импеданса  $X_C = 1/2\pi fC$ . При этом емкость измерительного датчика связана с измеряемым давлением некоторым соотношением  $C_x = Q(P, T)$ , в котором нелинейная функция  $Q$  (зависящая от измеряемого давления  $P$  и температуры окружающей среды  $T$ ) определяются при калибровке датчика, предшествующей его эксплуатации [10]. Для измерения температуры окружающей среды используется специальный преобразователь. Тогда функция преобразования датчика давления будет:

$$P_x = Q^{-1} \left( C_x \right)_{T=T_{in}} = Q^{-1} \left( \frac{1}{2\pi f A \sin \varphi} \right)_{T=T_{in}}.$$

Информацию с опорного датчика можно использовать для снижения влияния окружающей среды (влажность, вибрации и т.д.) на точность измерения.

Разработанные методы и алгоритмы обработки информации с выходов ВП были проверены с помощью имитационного моделирования, для чего был разработан соответствующий комплекс программ на языке C++ в среде Visual Studio 10. Некоторые результаты моделирования показаны ниже.

Сначала исследовалась точность предлагаемого способа оценки величин амплитуд с помощью алгоритма (6), (7) путём сравнения

результатов оценивания с известным алгоритмом, задаваемым стандартом IEEE-1057 [11]. На рис. 2 показаны в логарифмическом масштабе зависимости стандартного отклонения (STD) погрешности оценивания амплитуд пьезорезистивных ЧЭ от отношения сигнал/шум (SNR) на входе АЦП для различных величин  $\nu$ , характеризующих стабильность частоты генератора. Видно, что предлагаемый метод оценивания обладает большей точностью, которая практически не зависит от погрешности частоты генератора тока.

Далее сравнивались различные возможные топологии предлагаемого метода измерения с помощью токовой петли. Первая топология включала датчик с четырьмя пьезорезистивными ЧЭ и одним опорным, а вторая топология – датчик с двумя ЧЭ и одним опорным. Все остальные параметры схем выбирались одинаковыми. На рис. 3 показаны характерные результаты оценивания. Использование четырёх активных элементов вместо двух даёт незначительный выигрыш в точности, что позволяет сократить число активных элементов и упростить датчик в целом практически без потери точности измерений.

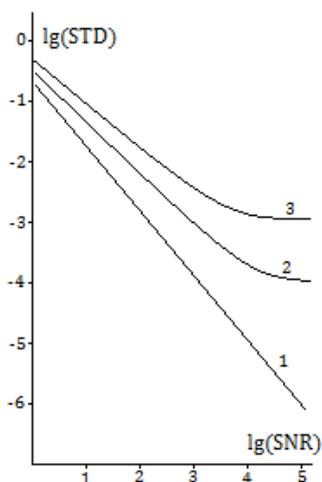


Рис. 3. Зависимости  $\lg(\text{STD})$  от  $\lg(\text{SNR})$  для двух методов оценивания: 1 – оценивание по методу (6), (7); 2,3 – оценивание по методике IEEE-1057 (кривая 2 соответствует расстройке частоты  $\nu = 30$  Гц, кривая 3 –  $\nu = 180$  Гц)

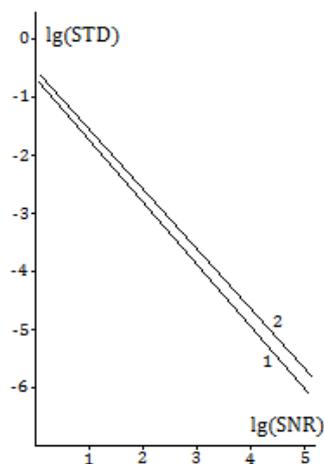


Рис. 4. Зависимости  $\lg(\text{STD})$  от  $\lg(\text{SNR})$  для двух топологий датчика: 1 – четыре измерительных пьезорезистора и один опорный; 2 – два измерительных пьезорезистора и один опорный

Далее было проведено компьютерное моделирование емкостного датчика абсолютного давления, в котором сравнивались точности измерения тремя методами: применяемым в существующих ёмкостных датчиках (сплошные линии, экспериментальные точки – квадратики) [11], предлагаемым в стандарте IEEE-1057 (пунктирные линии с ромбиками) и предложенным в работе (точечные линии с треугольниками).

Во всех экспериментах сравнивалась точность оценивания в зависимости от отношения сигнал/шум на входе АЦП и самого измеряемого давления.

Характерные результаты моделирования приведены на рис. 5, где показаны зависимости натурального логарифма дисперсии погрешности измерения давления от измеряемого давления (отношение сигнал/шум равно 60 дБ).

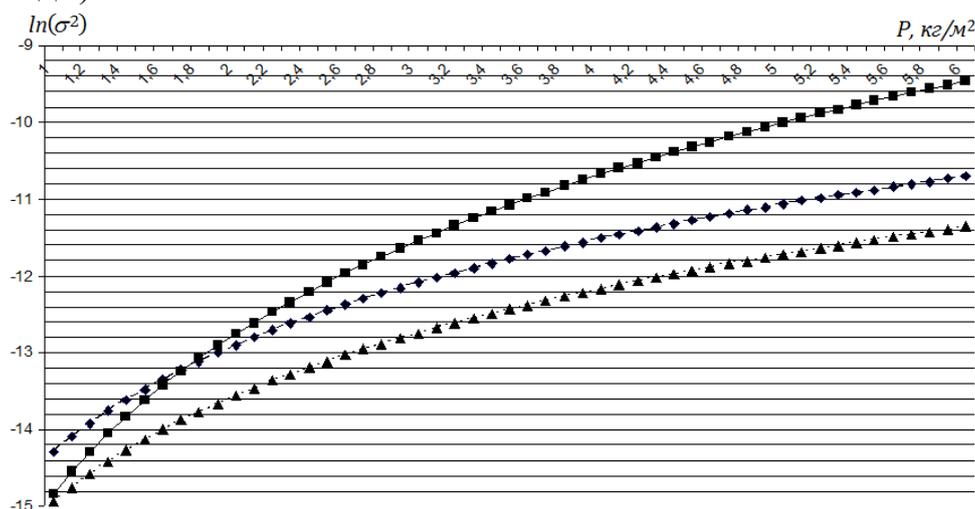


Рисунок 5. Зависимости дисперсии погрешности оценивания давления от измеряемого давления

Из рисунка видно, что при больших измеряемых давлениях предлагаемый метод измерения даёт существенно лучшие результаты, чем традиционные. Кроме того, скорость сходимости предложенного алгоритма в 3–4 раза выше скорости сходимости метода стандарта IEEE-1057.

На основании полученных результатов делается вывод о перспективности предлагаемого формирователя для использования в составе параметрических датчиков различных физических величин.

#### Литература

- 1 G. Asch, Les Capteurs en Instrumentation Industrielle, Bordas, Paris, 1991.
- 2 K.F. Anderson, IEEE I&M Magazine, Vol.1, No.1, March 1998. pp. 5-15.
- 3 Виноградов М.А. – Компоненты и технологии, 2008. – № 4. – С. 44-50.
- 4 Peng K.H., Uang C.M. – Reliability, Testing, and Characterization of MEMS/MOEMS III, Proceedings of SPIE, 2004. – Vol. 5343. – P. 292-301.
- 5 L’vov A.A., L’vov P.A., Konovalov R.S., Kuzin S.A. – Proceed. X Internl. Sci. Techn. Conf. “Dynamics of Systems, Mechanisms and

- Machines (Dynamics)”. Omsk State Technical University, Omsk, Russia, 2016.
- 6 Gureyev V.V., L'vov A.A., Pylskiy V.A. Proceed. IEEE Instrum. & Meas. Technol. Conf., Sorrento, Italy, 2006, P. 1257-1261.
  - 7 Львов А.А., Глазков В.П., Краснобельмов В.П., Коновалов Р.С., Соломин М.А. – Вестник СГТУ. 2014. № 4 (77). – С. 147-154.
  - 8 L'vov A., L'vov P., Konovalov R. Proc. 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf., St. Petersburg, Russia, P. 279-282.
  - 9 Gureev V.V., L'vov A.A., Pylskiy V.A. Proceedings of the 23rd IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conf. - Italy, Sorrento, - 2006. - P. 1257-1261.
  - 10 Николаенко А.Ю., Львов А.А., Львов П.А. – Тр. Международ. симп. «Надежность и качество»: в 2-х т., 2014. – Т. 2. – С. 57-59.
  - 11 Коновалов Р.С., Львов П.А., Львов А.А. Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ-2015): Тр. IV Междунар. науч. конф.: в 2 т. / Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 136-142.

# ОБОБЩЁННАЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В.Д. Мазин

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

Предлагается геометрический образ измерительного преобразования. Последовательно устанавливаются эквиваленты его главных составляющих: входного воздействия, аналогового и аналого-цифрового преобразований. Моделирующее векторное пространство может быть представлено как в собственно евклидовом, так и в псевдоевклидовом варианте, обладающем особыми свойствами. В этом пространстве задаётся аффинор – тензор чувствительностей к возмущениям. В итоге геометрический смысл измерительного преобразования может быть сформулирован как *действие аффинорного поля средства измерений и окружающей среды на каждый бесконечно малый вектор входного воздействия с последующим вычитанием из вектора выходной величины вектора её единицы.*

Уравнение измерений в операторной форме [1] может быть представлено как

$$\lambda^* = R_2 k R_1 \gamma(t), \quad (1)$$

где  $\lambda^*$  – результат измерения;  
 $\gamma(t)$  – входное воздействие;  
 $R_1$  – оператор, представляющий преобразования, выполняемые в аналоговой форме;  
 $k$  – оператор сравнения с единицей (аналого-цифровое преобразование);  
 $R_2$  – оператор, представляющий преобразования, выполняемые в числовой форме.

Это уравнение с полным правом может быть названо общим уравнением измерительного преобразования.

Представим геометрический образ соотношения (1) без оператора  $R_2$ , принадлежащего, очевидно, косвенному измерению. Задача заключается в «геометризации» каждого из трёх сомножителей:  $\gamma(t)$ ,  $R_1$  и  $k$ .

Прежде всего, естественно представить аналоговую часть измерительного устройства, в котором осуществляется преобразование (1), пространством аффинной связности, в общем составленном из нескольких подпространств, каждое из которых соответствует элементарному многообразию. Последние могут представлять как отдельные функциональные узлы измерительного канала (датчик, нормирующий преобразователь), так и их конструктивные элементы. Практически удобно выбрать в качестве координат такого многообразия измеряемую величину,

конструктивные параметры устройства и влияющие факторы, к которым мы будем относить и неинформативные параметры объекта. При этом имеет смысл отнести к последним и время  $t$ , фигурирующее в (1) в виде отдельного параметра. Его влияние на процессы в измерительном устройстве проявляется двояко: через динамические свойства последнего и через изменение со временем конструктивных параметров (старение).

Вектор входного воздействия  $\gamma(t)$ , естественно, не требует геометризаци, поскольку уже является геометрическим объектом. Его мерность, очевидно, совпадает с мерностью моделирующего пространства. Правда, в общем случае, при сложных физических закономерностях,  $\gamma(t)$  – не вектор, т.к. его координаты криволинейны. Прямолинейные (аффинные) координаты можно обнаружить лишь в бесконечно малой области, так что вектором можно считать совокупность дифференциалов входных величин. Полное входное воздействие получается после интегрирования.

Геометрическим эквивалентом оператора  $R_1$  является *аффинор*, закон, посредством которого каждому вектору  $X$  в пространстве сопоставляется некоторый вектор  $Y$  [2]. Если  $y = f(x_1, \dots, x_n)$  – функция аналогового преобразования  $n$  переменных, то

$$dy = \sum_i \frac{\partial y}{\partial x_i} dx_i \quad (2)$$

(подразумевается суммирование по  $i$ ). Аффинор является тензором, координаты которого  $a_{ii}$  согласно (2) определяются как  $a_{ii} = \frac{\partial y}{\partial x_i}$ .

Матрица таких координат, естественно, диагональна. Поскольку в общем случае координаты взаимозависимы, т.е.  $dx_i = \sum_j \frac{\partial x_i}{\partial x_j} dx_j$ , каждый вектор  $dx_i$

может быть разложен по составляющим  $dx_i^j = \frac{\partial x_i}{\partial x_j} dx_j$  (здесь, разумеется,

не имеется в виду суммирование), причём  $dx_i^i$  означает «самопроизвольное», т.е. вызванное неизвестными причинами изменение  $x_i$ . Если измерительное преобразование характеризует тип, т.е. множество отдельных экземпляров устройства (не производится индивидуальная градуировка), а  $x_i$  – конструктивный параметр, то  $dx_i^i$  относится к его технологическому разбросу. Таким образом, общим видом оператора  $R_1$  оказывается квадратная матрица  $A$ . Если принять  $x_i = x$  – измеряемой величине, то для бесконечно малой области  $a_{1j} = \frac{\partial y}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial x_j}$ , при этом  $a_{11} = \frac{\partial y}{\partial x}$ .

Элемент первого столбца  $a_{i1} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial x}$ . В общем случае  $a_{ij} = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial x_j}$ .

Такая форма выражения координат аффинора характеризует связь абсолютных изменений на входе и выходе. Если необходимо выразить связь относительных изменений на выходе с абсолютными на входе, то  $a_{ij} = \frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial x_j}$ .

Наконец, если интересует взаимозависимость относительных изменений на входе и выходе,  $a_{ij} = \frac{x_j}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{\partial x_i}{\partial x_j}$ , т.е. координаты становятся

безразмерными (процент на процент) и весьма информативными в плане оценки влияния различных факторов. Так, например, если  $x_j$  – конструктивный параметр датчика, и  $a_{jj} < 1$ , нестабильность этого параметра лишь частично отражается в нестабильности выходной величины. Если же  $a_{jj} > 1$ , параметр является критичным, и требования к его стабильности должны быть повышены.

Необходимо особо отметить, что в аффиноре не должны содержаться одновременно ненулевые  $a_{ij}$  и  $a_{ji}$ , поскольку каждый из них определяет составляющую выходного вектора, получающуюся вследствие взаимосвязи  $x_i$  и  $x_j$ . Такая взаимосвязь не должна учитываться дважды. В принципе безразлично, какую из двух координат положить равной нулю, следует исходить из практического удобства – какая из них проще интерпретируется, в каком случае проще получается расчёт. Если принять равными нулю все  $a_{ij}$  или  $a_{ji}$ , матрица получается треугольной.

Итак, можно написать:

$$\begin{bmatrix} dy_1 \\ dy_2 \\ \vdots \\ dy_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} dx_1^1 \\ dx_2^2 \\ \vdots \\ dx_n^n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Табл. 1 демонстрирует смысловое содержание различных частей матрицы аффинора. Влияние прибора на объект характеризуют такие координаты, содержащие  $\frac{\partial x}{\partial x_i}$ , которые относятся к его конструктивным

параметрам (напр., масса датчика). Производные  $\frac{\partial x}{\partial x_i}$ , которые относятся к влияющим факторам, как правило, должны полагаться равными нулю,

поскольку связь таких факторов с  $x$  обычно уже учтена в  $dx$ , считающемся заданным до подключения прибора.

Таблица 1. – Структура аффинора

Параметры объекта измерения		Влияние прибора на объект
	Внешние влияющие факторы	Влияние прибора на окружающее пространство
Влияние объекта на конструктивные параметры прибора	Влияние окружающего пространства на прибор	Конструктивные параметры прибора

Координаты  $a_{21} - a_{n1}$  выражают влияние объекта на прибор и на окружающую среду. Таким образом, мы здесь различаем координаты  $a_{1i}$  и  $a_{i1}$  по причинно-следственной направленности взаимодействия прибора с объектом. Второй индекс координаты выражает причину, первый – следствие. Хотя формально и в данном случае безразлично, какой из двух координат воспользоваться, проще интерпретируется, очевидно, координата, отвечающая здравому смыслу. Если взаимодействие имеет двустороннюю направленность, понятия причины и следствия, очевидно, утрачивают смысл.

Влияние объекта на прибор, скорее всего, является гипотетическим. Однако если в качестве  $x_i$  выбрать чувствительность, то производная  $\frac{\partial x_i}{\partial x}$  будет характеризовать погрешность линейности. Влияние объекта на окружающую среду следует признать нулевым, поскольку оно, подобно обратному влиянию, уже учтено в изменениях влияющих факторов. Соответственно нулевыми должны быть соответствующие производные  $\frac{\partial x_i}{\partial x}$ .

Подматрица с вершинами  $a_{22}, a_{2n}, a_{n2}, a_{nn}$  характеризует инструментальные погрешности. Пусть координаты  $x_2 - x_i$  представляют конструктивные параметры, а координаты  $x_{i+1} - x_n$  – влияющие факторы. Тогда подматрицу можно разбить на 4 блока с вершинами:  $a_{22}, a_{2i}, a_{i2}, a_{ii}; a_{2(i+1)}, a_{2n}, a_{i(i+1)}, a_{in}; a_{(i+1)2}, a_{(i+1)i}, a_{n2}, a_{ni}$  и  $a_{(i+1)(i+1)}, a_{(i+1)n}, a_{n(i+1)}, a_{nn}$ . Первый из них характеризует погрешности типа «параметр-параметр», устанавливая взаимовлияние конструктивных параметров. Эти погрешности образуют основную погрешность прибора. Если они линейно меняются с

изменением измеряемой величины, они являются мультипликативными. Второй блок –  $a_{2(i+1)}, a_{2n}, a_{i(i+1)}, a_{in}$  – описывает воздействие на конструктивные параметры влияющих факторов, т.е. погрешности типа «фактор-параметр». Они также являются мультипликативными, если линейно меняются с измеряемой величиной. Третий блок, «параметр-фактор», характеризует влияние прибора на окружающую среду, которое обычно не учитывается. Однако прибор находится с окружающей средой в том же отношении, что и с объектом, и способен изменить её характеристики. В особых случаях, при высоких требованиях к точности, а также с точки зрения экологии, электромагнитной совместимости, это изменение следует учитывать. Наконец, четвёртый блок, «фактор-фактор» описывает взаимодействие влияющих факторов. Второй, третий и четвёртый блоки выражают дополнительные погрешности.

Из (3) следует, что аффино́р в приведённом виде определяет абсолютные погрешности.

Поскольку аффино́р характеризует бесконечно малую область, он в общем меняется от точки к точке, образуя *аффино́рное поле*. Скорость изменения координат аффино́ра при движении в пространстве (изменении физической ситуации) определяется, очевидно, производными вида  $\frac{\partial^2 x}{\partial x_i \partial x_j}$ ,

которые определяют *объект связности* пространства. Последний выражает степень изменения координат вектора при его параллельном перенесении вдоль некоторой траектории.

Для определения суммарной погрешности следует вначале просуммировать дифференциалы-векторы согласно (2), а затем произвести интегрирование. Однако для сложения векторов должна быть известна их взаимная ориентация, что равносильно введению метрики в векторном пространстве. Последняя должна учитывать корреляционные связи между составляющими погрешности, подразумеваемыми в общем случае случайными.

Перейдём к интегрированию. Интегрирование по  $x$  координаты аффино́ра  $a_{11}$  (чувствительности) даёт  $y = f(x)$  – аналитическое выражение функции преобразования. Эта функция наверняка принадлежит одной из групп, перечисленных в табл. 2.

Однако целью измерения является не преобразование, а сохранение. В самом деле, для того, чтобы по измеренным характеристикам преобразованного сигнала можно было восстановить характеристики исходного, необходимо сохранить какие-то соотношения между сигналами при использованном преобразовании.

Таблица 2. – Группы преобразований и их инварианты

Группа	Аналитическое выражение	Инвариант	Аналитическое выражение
Тождественная	$y = x$	Евклидово расстояние	$x_2 - x_1$
Сдвига	$y = x + \beta$	Евклидово расстояние	$x_2 - x_1$
Подобия	$y = \alpha x$	Отношение 2-х точек	$x_2 / x_1$
Аффинная (линейная)	$y = \alpha x + \beta$	Простое отношение 3-х точек прямой	$\frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_2}$
Проективная	$y = \frac{\alpha x + \beta}{\gamma x + \delta}$	Сложное отношение 4-х точек прямой	$\frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_3} \cdot \frac{x_4 - x_1}{x_2 - x_4}$
Монотонных преобразований	$y_2 \geq y_1$ при $x_2 \geq x_1$ , либо $y_2 \leq y_1$ при $x_2 \geq x_1$	-	-

С этой точки зрения измерительный преобразователь следовало бы называть не преобразователем, а передатчиком, т.е. в данном случае название отражает не основное, а сопутствующее свойство вещи. Это происходит потому, что передача значения величины и её преобразование (в том числе масштабное, т.е. преобразование энергетического уровня) находятся в том же отношении, в каком находятся сущность и явление. Именно преобразование, а не передача значения открыто непосредственному взгляду. Как и в других подобных случаях, предмет получил название по имени его внешнего, а не глубинного свойства.

Возможно, причина до сих пор не преодоленной трудности с классификацией измерительных преобразователей заключается в том, что все до сих пор известные её варианты строятся на той стороне вышеупомянутого дуализма, которая характеризует явление, а не сущность. Иными словами, классифицируются виды преобразований, в то время как следует классифицировать виды сохранения информации. Здесь полезно подчеркнуть, что различные геометрии рассматриваются как теории инвариантов соответствующих групп преобразований [3].

Если оценить с позиции сохранения преобразования, приведённые в табл. 2, то нужно обратить внимание на то, что из них все, кроме последнего, имеют инвариант.

Ситуация, имеющая место при использовании дробно-линейных и подчинённых им преобразований, согласуется с общим представлением о процедуре измерения. Первые такие процедуры, например, при измерении длины, состояли из двух этапов: взаимного перемещения объекта измерения и меры и их сравнения между собой. Исторически сложилось так, что эта изначальная суть измерения ныне воспринимается лишь второй своей частью, в то время как не в меньшей степени значима и первая, причём роль неперемещаемого на заре измерений механического движения играют теперь измерительные преобразования. Аналогии между перемещениями в обычном пространстве и измерительными преобразованиями может быть придан более формальный характер. При измерении длины роль сохраняемого соотношения играет расстояние между точками, которое сохраняется при любых сдвигах и поворотах. Если на множестве всех возможных сигналов определить расстояние в терминах величин, сохраняющихся при таких преобразованиях, то мы тем самым получим геометрическую интерпретацию измерительной процедуры как преобразования, сохраняющего расстояние, т.е. как «перемещения» в соответствующем пространстве. При дробно-линейных преобразованиях (например, при использовании делителя напряжения) сохраняется сложное отношение. Если обозначить его  $V$ , то сохраняется конструкция  $|c \cdot \ln V|$ , где  $c$  – постоянная, называемая *проективной метрикой*. Поскольку дробно-линейные преобразования сохраняют проективную метрику, их естественно назвать перемещениями в проективном пространстве. При этом они являются наиболее общими из ряда преобразований, перечисленных выше, каждое из которых сохраняет расстояние. Именно это свойство позволяет эффективно осуществлять коррекцию погрешностей, либо реализовать алгоритмы, исключаяющие их появление [4]. В этих терминах отмеченные выше этапы процедуры измерения состоят в перемещении в проективном пространстве и совмещении с эталоном, т.е. полностью аналогичны простейшей процедуре измерения длины.

В отличие от прочих последнее преобразование не имеет инварианта. Это логично увязывается с трудностями, которые встречаются при построении средств измерений с характеристикой преобразования, отличающейся от первых пяти.

Что касается интегрирования по конструктивным параметрам и влияющим факторам, то здесь отметим следующее. Такое интегрирование может проводиться не только с целью определения погрешности (частной, либо суммарной), но и с целью определения изменений у при изменении конструктивных параметров в процессе проектирования. При этом суммирование также должно проводиться с учётом метрических свойств пространства.

Нам осталось геометризовать оператор сравнения с единицей  $k$  в (1). Поскольку в результате такого сравнения получается число, ясно, что происходит отделение количества от качества, избавление величины от её физического носителя. Обычно сравнение реализуется путём вычитания. Логарифмирование основного уравнения измерений даёт векторную сумму логарифмов числового значения  $\ln\{y\}$  и единицы  $\ln[y]$  [5, 6]. Отсюда становится ясным геометрическое содержание оператора  $k$  – вычитание из вектора  $\ln y$  вектора  $\ln[y]$ .

В заключение сформулируем кратко геометрический смысл измерительного преобразования: *оно представляет действие аффинорного поля средства измерений и окружающей среды на каждый бесконечно малый вектор входного воздействия с последующим вычитанием из вектора выходной величины вектора её единицы.*

#### Литература

- 1 Цветков Э.И. Основы теории измерения величин / Э.И. Цветков, И.Н. Кротков // 3-е Всесоюз. совещ. по теорет. метрологии: Тез. докл.- 1986.- С. 55 - 56
- 2 Рашевский П.К. Риманова геометрия и тензорный анализ / П.К. Рашевский // М., «Наука», 1967
- 3 Клейн Ф. Сравнительное обозрение новейших геометрических исследований / Ф. Клейн // Об основаниях геометрии. - 1956
- 4 Hung G. Nguyen. Group-theoretic approach as a general framework for sensors, neural networks, fuzzy control and genetic boolean networks / Hung G. Nguyen, Vladik Kreinovich, Chitta Baral, V. Mazin // 10-th IMEKO TC7 International Symposium: Proceedings. - 2004
- 5 Мазин В.Д. Представление физической величины в псевдоевклидовой плоскости / В.Д. Мазин // НТВ СПбГПУ.- 2012.- № 3, С. 56 - 63
- 6 Mazin V. Physical quantity as a pseudo-euclidean vector / V. Mazin // АСТА ИМЕКО.-2015.- № 4, Р. 4 - 8

### Секция № 03 «Физико-химические измерения»

Содержание	стр.
Добровольский В.И., Оганян Н.Г., Прокунин С.В., Балаханов Д.М., Стахеев А.А. <i>ФГУП «ВНИИФТРИ»</i> . Государственные первичные эталоны ВНИИФТРИ в области физико-химических измерений	117
Климов А.Ю., Заречнов К.А., Вишняков И.М. <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> Новый метод измерения высокого влагосодержания газов с использованием хромато-масс-спектрометра.	128
В.И. Добровольский, В.А. Звездина, С.В. Прокунин, А.Н. Щипунов. <i>ФГУП «ВНИИФТРИ»</i> . Исследование метрологических характеристик буферных растворов, приготовленных из высокочистых веществ, для применения их в качестве эталонов сравнения в составе государственного первичного эталона показателя рН активности ионов водорода в водных растворах ГЭТ 54-2011.	134
Ю.А. Кустиков, Д.Н. Козлов, О.А. Пинчук, Ю.А. Крамаренко <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> . Совершенствование государственного первичного специального эталона единицы массовой концентрации частиц в аэродисперсных средах	142
Л.А. Конопелько, А.М. Полянский, В.А. Полянский, Ю.А. Яковлев <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> , ООО «НПК ЭПТ», ИПМаш РАН	144
Я.К. Чубченко, Л.А. Конопелько <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»</i> , Разработка стандартных образцов изотопного состава углерода нового типа	146

## ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ЭТАЛОНЫ ВНИИФТРИ В ОБЛАСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Добровольский В.И., Оганян Н.Г., Прокунин С.В.,  
Балаханов Д.М., Стахеев А.А.

*ФГУП «ВНИИФТРИ»*

## ГОСУДАРСТВЕННЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ЭТАЛОНЫ ВНИИФТРИ В ОБЛАСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Добровольский В.И., Оганян Н.Г., Прокунин С.В.,  
Балаханов Д.М., Стахеев А.А.

*ФГУП «ВНИИФТРИ»*

В докладе представлено описание, метрологические характеристики и области применения государственных первичных эталонов: показателей активности ионов водорода рН и активности рХ ионов в водных растворах, единиц дисперсного состава аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов, единиц массовой концентрации кислорода и водорода в жидких средах, объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов.

Измерения основных физико-химических величин, таких как водородный показатель, электропроводность, ионный состав, окислительно-восстановительный потенциал, растворенный кислород и водород в жидких средах, а также измерения параметров аэрозолей, суспензий и порошков широко используют для оценки качества неорганических и органических веществ, пищевых продуктов, лекарств, нефтепродуктов, для изучения и контроля состояния водных объектов окружающей среды. Для контроля качества выпускаемой химической продукции существует несколько сотен нормативно-методических документов, регламентирующих порядок и процедуры выполнения этих измерений.

Для обеспечения единства измерений во ВНИИФТРИ созданы, внедрены и успешно эксплуатируются государственные первичные эталоны (ГПЭ) единиц вышеназванных величин. Название и метрологические характеристики государственных эталонов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Название и метрологические характеристики ГПЭ

Название ГПЭ	Метрологические характеристики
Государственный первичный эталон показателя рН активности ионов водорода в водных растворах (ГЭТ 54-2011)	рН в водных растворах в диапазоне от 1 до 12 при температуре от 0 до 95 °С. СКО= 0,001 при T= 25 °С; Неисключенная систематическая погрешность не превышает 0,0017 при T=25 °С; Расширенная неопределенность 0,004 при k=2.
Государственный первичный эталон показателей активности рХ ионов в водных растворах (ГЭТ 171-2011)	рХ активности ионов в водных растворах в диапазоне от 1 до 7. СКО= 0,001. Неисключенная систематическая погрешность не превышает 0,0016. Расширенная неопределенность 0,004 при k=2.
Государственный первичный эталон единиц дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов (ГЭТ 163-2010)	Определение размера частиц и их счетной концентрации - размер частиц: 0,03...1000 мкм - счетной концентрации: 1·10 <sup>5</sup> ...1·10 <sup>12</sup> м <sup>3</sup> - размер частиц: в диапазоне от 0,03 до 0,5 мкм - 2 %; в диапазоне от 0,5 до 1000 мкм - 1 %; - счетной концентрации: 1-2 %; в диапазоне от 0,03 до 0,5 мкм - 4 %; в диапазоне от 0,5 до 1000 мкм - 2 % при доверительной вероятности 0,95
Государственный первичный эталон единицы массовой концентрации кислорода и водорода, растворенных в жидких средах (ГЭТ 212-2014)	Диапазон значений массовой концентрации кислорода в воде составляет 1–100000 мкг/дм <sup>3</sup> . СКО не превышает (0,2 – 300) мкг/дм <sup>3</sup> . Неисключенная систематическая погрешность не превышает (0,5 – 130) мкг/дм <sup>3</sup> . Расширенная неопределенность (0,8 – 620) мкг/дм <sup>3</sup> при k = 2. Диапазон значений массовой концентрации водорода в воде составляет 1–20000 мкг/дм <sup>3</sup> . СКО не превышает (0,8 – 80) мкг/дм <sup>3</sup> . Неисключенная систематическая погрешность не

Название ГПЭ	Метрологические характеристики
	превышает (1,0 – 120) мкг/дм <sup>3</sup> . Расширенная неопределенность (2,0 – 210) мкг/дм <sup>3</sup> при коэффициенте охвата k = 2.
Государственный первичный эталон единиц объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов (ГЭТ 177-2010)	Диапазон значений полярной плотности электрического заряда (счетной концентрации) биполярных и униполярных положительных и отрицательных легких аэроионов ионизированного воздуха, воспроизводимых эталоном составляет от $1,6 \cdot 10^{-2}$ до 200 нКл·м <sup>-3</sup> (от $10^8$ до $1,2 \cdot 10^{12}$ м <sup>-3</sup> ). Среднее квадратичное отклонение результата измерений при 8 независимых измерениях не превышает 4,0%. Неисключенная систематическая погрешность (при доверительной вероятности P=0,99) не превышает 4,0 %. Расширенная неопределенность 7,5 % при уровне доверия p=0,99.

### **Измерения показателей активности ионов водорода рН в водных растворах**

Область применения: медицина; современная клиническая диагностика; экологический мониторинг; сфера национальной безопасности и обороны; тепловая и ядерная энергетика; микроэлектроника; химическая промышленность и др.

Определение водородного показателя (рН) является на сегодняшний день самым востребованным методом контроля состава водных растворов и других жидких сред. Водородный показатель является важнейшей физико-химической характеристикой, определяющей основные кислотно-щелочные свойства растворов.

Средства измерений рН по их количеству и типам занимают одно из первых мест среди анализаторов жидкости, их парк составляет несколько миллионов приборов в Российской Федерации.

В основе метрологического обеспечения измерений рН находятся межгосударственные стандарты ГОСТ 8.134 «Государственная система

обеспечения единства измерений. Метод измерений рН на основе ячеек Харнеда» и ГОСТ 8.120 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений рН.

Для воспроизведения, хранения и передачи шкалы рН во ФГУП «ВНИИФТРИ» применяется Государственный первичный эталон шкалы рН. Государственный первичный эталон шкалы рН предназначен для воспроизведения, хранения и передачи шкалы рН в диапазоне от 1 до 12.

Метрологические характеристики эталона многократно подтверждены результатами международных ключевых сличений под эгидой Международного бюро мер и весов (МБВМ).

Предварительные результаты последнего международного ключевого сличения в области измерения показателя активности ионов водорода в карбонатном буферном растворе с номинальным значением рН ~ 10,0 (ССQM-K18.2016), представленные в апреле 2017 года на заседании рабочей группы по электрохимическому анализу в МБВМ, показали успешное участие ФГУП ВНИИФТРИ. По результатам сличения, после опубликования финального отчета, ФГУП «ВНИИФТРИ», планирует подать заявку на получение СМС-строки в рамках измерительных возможностей СИРМ МРА.

Следует также отметить, что в настоящее время ФГУП «ВНИИФТРИ» принимает активное участие в международных сличениях в водно-спиртовых смесях (ССQM-P152). Актуальность сличений связана с развитием новых типов биотоплив, основанных на этанольных смесях. Данные сличения на мировом уровне проводятся впервые, поэтому носят пилотный характер.

Для передачи единицы водородного показателя средствами измерений рН традиционно используются стандарт-титры и буферные растворы – рабочие эталоны рН по ГОСТ 8.135 «Стандарт-титры для приготовления буферных растворов – рабочих эталонов рН 2-го и 3-го разрядов. Технические и метрологические характеристики. Методы их определения».

В настоящее время ФГУП «ВНИИФТРИ» выпускает эталонные вещества 1-го разряда, а также и стандарт-титры и буферные растворы для приготовления рабочих эталонов рН 2-го разряда. Они прошли испытания с целью утверждения типа, внесены в Государственный реестр средств измерений и являются допущенными к применению на территории Российской Федерации.

Допускаемые доверительные границы абсолютной погрешности ( $\delta$ ) значений рН не превышают для рабочих эталонов рН:

- 1-го разряда - 0,004 рН (при  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ); 0,006 рН (при  $T = 0 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$ );
- 2-го разряда - 0,01 рН;

Рабочие эталоны рН 1-го разряда, стандарт-титры 2-го, цветные буферные растворы, разработанные в ФГУП «ВНИИФТРИ», широко используются в аналитических лабораториях, региональных и отраслевых метрологических службах.

Разработанные в ФГУП «ВНИИФТРИ» рабочие эталоны рН по своим метрологическим характеристикам не уступают зарубежным аналогам.

### **Измерения показателей активности ионов (рХ) в водных растворах**

Область применения: сельское хозяйство; контроль плодородия почв и качества пищевых продуктов; экология: ионный состав природных и сточных вод; медицина, биотехнологические и фармацевтические производства; океанология и гидрология поверхностных вод суши; химическая промышленность и другие отрасли.

Проведение измерений с использованием ионоселективных электродов является оптимальным методом анализа, прежде всего, водных растворов и аналитических образцов, хорошо растворимых в воде или содержащих хорошо растворимые в водных растворах компоненты.

В экологической области рХ-метрия используется, прежде всего, в исследованиях для определения качества питьевой и природных вод (СанПиН 2.1.4.1074-01) и включает в себя измерения концентрации фторид-ионов, нитрат-ионов, ионов тяжелых металлов.

В медицине рХ-метрия используется для определения различных биологически активных органических соединений и лекарственных препаратов.

Для метрологического обеспечения рХ-метрии во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан Государственный первичный эталон показателей рХ активности ионов в водных растворах ГЭТ 171-2011.

Передача единицы показателя активности ионов в водных растворах осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 8.641-2013 моноэлементными градуировочными растворами – рабочими эталонами активности ионов. Передача единицы показателя активности ионов от Государственного первичного эталона ГЭТ 171-2011 рабочим эталонам рХ – моноэлементным градуировочным водным растворам ионов осуществляется методом компарирования.

ФГУП «ВНИИФТРИ» является головной организацией России по метрологическому обеспечению в области рХ-метрии. ФГУП «ВНИИФТРИ» единственная в России организация, выпускающая моноэлементные растворы – рабочие эталоны активности ионов  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  (рХ) в водных средах.

Следует сказать, что ФГУП «ВНИИФТРИ» является ведущим институтом в области метрологического обеспечения по рН-, рХ-метрии в России, оказывая услуги по поверке и калибровке рабочих эталонов рН ведущим центрам стандартизации и метрологии, которые в свою очередь, обеспечивают метрологические работы всех соответствующих потребителей в России.

### **Измерения единиц дисперсных параметров аэрозолей и взвесей и порошкообразных материалов**

Область применения: ракетно-космическая промышленность; авиастроение; оборона и безопасность; энергетика; электронная и радиоэлектронная промышленность; двигателестроение; фармацевтическая промышленность; экология, металлургическая и добывающая промышленность; нефть и газ.

Государственный первичный эталон ГЭТ 163-2010 используют для определения значений размера и счетной концентрации частиц, воспроизводящих единицы дисперсных параметров аэрозолей, взвесей и порошкообразных материалов, применяя методы оптической микроскопии, дифракции лазерного излучения, электрической дрейфовой подвижности, интерферометрии и счета частиц методом динамического рассеяния света, методом диффузионной спектроскопии.

Создание эталона, реализующего несколько методов, позволило обеспечить измерение дисперсных характеристик аэрозолей и взвесей с метрологическими характеристиками, удовлетворяющими современные потребности промышленности, обороны и наукоемких отраслей экономики Российской Федерации.

**Метод «лазерной дифракции».** Метод основан на измерении индикатрисы рассеяния излучения, возникающей при рассеянии плоской монохроматической электромагнитной волны на ансамбле частиц аэрозоля или взвеси. Рассеянное излучение измеряют многоэлементным фотоприемным устройством в широком диапазоне углов. Затем, решая обратную задачу рассеяния в рамках определенных модельных представлений (например, представлений о том, что частицы имеют сферическую форму), определяют значения функции распределения частиц по размерам, их концентрацию. В зависимости от размера частиц, а точнее от отношения  $\pi d/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны электромагнитного излучения,  $d$  — радиус частицы, индикатриса рассеяния меняется, причем становится тем более симметричной, чем меньше показатель  $d$ .

**Метод динамического рассеяния света.** Метод позволяет определить коэффициент диффузии дисперсных частиц в жидкости путем

анализа характерного времени флуктуаций интенсивности рассеянного света. По коэффициенту диффузии рассчитывается радиус наночастиц. Хаотическое броуновское движение дисперсных частиц вызывает микроскопические флуктуации их локальной концентрации. В свою очередь, эти флуктуации приводят к локальным неоднородностям показателя преломления среды. При прохождении лазерного луча через такую среду часть света будет рассеяна на этих неоднородностях. Флуктуации интенсивности рассеянного света будут соответствовать флуктуациям локальной концентрации дисперсных частиц. Информация о коэффициенте диффузии частиц содержится в зависящей от времени корреляционной функции флуктуаций интенсивности.

**Метод «дифференциальной подвижности».** Метод реализуется с помощью дифференциального анализатора подвижности, где с помощью электростатического поля от приложенного к стержню напряжения меняется траектория заряженных частиц и происходит их сепарация по размерам. В цилиндрический конденсатор, к обкладкам которого приложено высокое напряжение, поступают частицы аэрозоля, на которые действуют силы электрического поля  $F_E$ , силы Стокса  $F_D$  и аэродинамическая сила чистого воздуха. При равенстве силы электрического поля и силы Стокса, на частицы воздействует только аэродинамическая сила, которая увлекает частицы вниз. После дифференциального анализатора подвижности частицы поступают в конденсационный счетчик частиц. При этом частицы аэрозоля выступают в роли ядер конденсации перегретых паров жидкости, и после охлаждения, подсчитываются оптическим счетчиком частиц.

**Метод диффузионной спектроскопии.** Суть метода состоит в определении коэффициента диффузии частиц по измеренному значению коэффициента проскока частиц через диффузионную батарею, а по найденному значению коэффициента диффузии оценивается размер частиц. Для измерения наночастицы укрупняются путем конденсации на них паров разных веществ, а затем регистрируются лазерным счетчиком частиц.

**Метод измерения счетной концентрации частиц, основанный на рассеянии оптического излучения.** В отличие от лазерных анализаторов размеров частиц, использующих для анализа ансамбль частиц, счетчик частиц фиксирует единичное событие, связанное с процессом взаимодействия зондирующего излучения с частицей в некотором рабочем объеме. При этом интенсивность рассеянного излучения пропорциональна размеру частиц, а количество взаимодействий – их концентрации.

**Метод измерения параметров наночастиц на основе интерферометрии контролируемой среды (оригинальный метод «ВНИИФТРИ»).** Сущность метода заключается в том, что нано-частицы,

взвешенные в среде, изменяют комплексный показатель преломления среды, а, следовательно, и набег фазы зондирующей электромагнитной волны внутри интерферометра.

**Микроскопический метод измерения дисперсных параметров частиц.** Метод реализуется с помощью микроскопа, камеры и программного обеспечения. Метод используется для передачи единицы размера из микронного в субмикронный и нано-метровый диапазон.

**Генераторы наночастиц.** Возможность контролируемого получения наночастиц латекса, солей, металлов и их оксидов широко используется для проведения исследовательских работ, а также лабораторных испытаний устройств. Генераторы наночастиц различного принципа действия позволяют получать взвешенные в газоносителе наноматериалы широкого диапазона размеров и концентраций.

**Меры размера и счетной концентрации моодисперсных частиц МНР.** Для передачи единиц размера и счетной концентрации на рабочие средства измерений в нанометровом и субмикронном диапазонах размеров широко применяются меры линейного размера наночастиц. Для этих целей разработан и аттестован набор мер нанометрового и субмикронного диапазонов. Меры представляют собой взвеси моодисперсных наночастиц латекса в водной среде.

Государственный первичный эталон ГЭТ 163-2010 по своим техническим и метрологическим характеристикам соответствует современному уровню развития науки и техники, уровню ведущих метрологических центров, таких как NIST, PTB, PNL, NMI.

В настоящее время ВНИИФТРИ продолжает разработку методов и средств воспроизведения и передачи единиц дисперсных параметров аэрозолей и взвесей в нанометровом диапазоне размеров частиц.

С 2015 года в рамках ВЦП «Проведение фундаментальных исследований в области метрологии, разработки государственных (в том числе первичных) эталонов единиц величин» проводятся исследования по расширению динамического диапазона ГЭТ 163-2010 и его функциональных возможностей в области воспроизведения единицы дзета-потенциала.

Для решения этих задач ФГУП «ВНИИФТРИ» были проведены экспериментальные и теоретические исследования методов и средств измерения дзета-потенциала и выпущены следующие межгосударственные стандарты:

1) ГОСТ 8.653.1–2016 (ISO 13099-1:2012) "ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 1. Электрокинетические методы".

2) ГОСТ ISO 13099-2-2016 " ГСИ. Методы определения дзета-потенциала. Часть 2. Оптические методы".

## **Измерения единиц массовой концентрации растворенных газов (кислород и водород)**

Область применения: энергетика; химическая и пищевая промышленность; рыбное хозяйство; микроэлектроника; металлургия; медицина; экологический мониторинг; приборостроение.

Контроль содержания кислорода и водорода – очень важная проблема, в решении которой заинтересованы многие отрасли народного хозяйства, включая металлургию, химическую промышленность, сельское хозяйство, рыбную и пищевую промышленность, службы охраны окружающей среды. Аналитический контроль кислорода и водорода необходим для эффективного решения разнообразных научных и практических задач. Особое значение он приобретает в оценке безопасности промышленных объектов, медицине и биологии при изучении процессов газообмена, диагностических и лечебных мероприятиях, в задачах окружающей среды. Решить эти задачи можно с помощью современной контрольно-измерительной аппаратуры.

Растворённый кислород – один из важнейших показателей качества воды. Контроль его содержания проводится как в природных незагрязнённых водах, так и водах, прошедших очистку. Содержание растворённого водорода в цветной металлургии является важнейшим показателем из-за возможного образования газовой пористости при отверждении металлов. В химической промышленности растворённый кислород – окислитель, присутствие которого необходимо учитывать, при проведении химических реакций в водных растворах. В атомной энергетике на первое место встает вопрос безопасности эксплуатации ядерных реакторов, в том числе контроль за содержанием растворенных кислорода и водорода в охлаждающих контурах водо-водяных реакторов.

Краткое описание принципа работы эталона: для воспроизведения единицы массовой концентрации растворенных в воде кислорода и водорода в рабочей камере используются растворы, получаемые, основываясь на законе Генри-Дальтона, насыщением раствора азотно-кислородными и азотно-водородными поверочными газовыми смесями в замкнутом объеме в условиях постоянной температуры и заданном давлении (от атмосферного до 1200 кПа).

Перечень проводимых работ на эталоне:

- Поверка, калибровка рабочих эталонов, СИ растворенных газов в жидких средах.
- Проведение испытаний с целью утверждения типа СИ растворенных газов в жидких средах.

- Разработка и аттестация методик измерений различных параметров растворенных газов в жидких средах.

- Изготовление и аттестация поверочных установок в качестве рабочих эталонов единицы массовой концентрации кислорода и водорода в жидких средах.

### **Измерения объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов**

Область применения: санитарно-гигиенический контроль атмосферного воздуха.

Проблема измерения счетной концентрации аэроионов и объемной плотности электрического заряда дисперсной фазы аэрозолей в настоящее время крайне актуальна. Установлено, что счетная концентрация легких аэроионов и электрические свойства аэрозоля напрямую связаны с различными заболеваниями дыхательных путей, крови, сердечно-сосудистыми явлениями. В РФ и промышленно развитых странах при санитарно-гигиеническом контроле атмосферного воздуха нормируются не только счетная концентрация легких аэроионов, но и соотношения счетных концентраций положительных и отрицательных легких аэроионов.

В настоящее время для измерения счетной концентрации аэроионов и плотности электрического заряда аэрозолей используются методы аспирационного конденсатора, фильтра объемных зарядов, времяпролетные, электроиндукционные, электростатической преципитации и зондовые методы.

Для обеспечения единства измерений в этой области в РФ создан и функционирует ГПЭ единиц объемной плотности электрического заряда ионизированного воздуха и счетной концентрации аэроионов – ГЭТ 177-2010, основанный на создании среды сравнения с задаваемыми значениями характеристик аэроионного состава воздуха излучением от радионуклидных источников и измерении этих характеристик методами аспирационного конденсатора и фильтра объемных зарядов. Данный подход позволяет обеспечивать воспроизводимость измерений счетной концентрации и объемной плотности электрического заряда аэроионов в широком диапазоне их подвижностей и минимизировать влияние аэрозольных частиц на результаты измерения счетной концентрации легких аэроионов.

В лаборатории продолжаются работы по усовершенствованию и расширению функциональных возможностей эталона.

**В настоящее время ВНИИФТРИ продолжает разработку нового ГЭТ единиц массовой (молярной) концентрации неорганических компонентов в водных растворах на основе гравиметрического и спектральных методов.**

Государственный первичный эталон будет применяться для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы массовой (молярной) концентрации компонентов неорганических веществ в водных растворах вторичным эталонам, рабочим эталонам, рабочим средствам измерений (аналитическим приборам) при помощи эталонов сравнения методом сличения и методом прямых измерений.

Эталоны сравнения – комплекс аппаратуры, состоящий из: масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой; атомно-эмиссионного спектрометра и атомно-абсорбционного спектрометра. Необходимость включения в эталон всех приборов обусловлена их измерительными возможностями. Высокочувствительный метод масс-спектрометрии выдает большие погрешности на концентрациях выше  $10^{-7}$  г/л, для этого необходимы методы атомной эмиссии и атомной абсорбции. Также все три прибора необходимы для подтверждения статуса государственного первичного эталона, а также для участия в международных и ключевых сличениях.

Приготовление эталонных растворов концентрации неорганических веществ (компонентов) в водных растворах предполагает использование сверхчистой воды, в которой концентрация мешающих ионов не превышает  $10^{-9}$  г/л. Для этого необходимо использовать систему деионизации. Контроль содержания ионов металлов в деионизованной воде предлагается производить путем измерения удельной электропроводности и концентрации общего органического углерода.

Участие разрабатываемого эталона в международных ключевых, пилотных и дополнительных сличениях в рамках МБМВ и метрологических региональных организаций показали успешный результат по ряду показателей.

# НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОКОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ ГАЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХРОМАТО-МАСС-СПЕКТРОМЕТРА

Климов А.Ю., Заречнов К.А., Вишняков И.М.  
*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»*

В настоящее время существуют десятки способов измерения влажности газов. Новые возможности в этом направлении предоставляет хромато-масс-спектрометрия. Сочетание стандартной неполярной хроматографической колонки с высокоселективным масс-спектрометрическим детектором позволяет анализировать воду в чистых газах и газовых смесях даже в присутствии различных мешающих компонентов.

Продемонстрирована возможность измерения влаги в воздухе, в азоте, в диоксиде углерода, в диметиловом эфире, в смесях с аммиаком, а также в природном газе.

Отдельное внимание уделено вопросам градуировки хромато-масс-спектрометра. Во всём измерительном диапазоне показана пригодность градуировки с использованием искусственных газовых смесей, приготовленных весовым способом в баллонах под давлением.

Для случаев относительно большого влагосодержания, не требующих высокой точности анализа, продемонстрирована возможность одноточечной градуировки по воде атмосферного воздуха. Содержание влаги при этом может быть определено на основе данных о температуре, относительной влажности и давлении воздуха, измеряемых, например, при помощи термогигрометра.

Хромато-масс-спектрометр имеет линейный динамический диапазон по  $H_2O$  превышающий три порядка, и позволяет измерять молярную долю воды от уровня единиц ppm до уровня 100 %-й влажности при комнатной температуре.

## **Введение**

Вода является одним из самых распространённых веществ на Земле. Содержание влаги нормируется в большинстве чистых, технологических и сжиженных газов. Это обуславливает необходимость количественного анализа воды в различных газовых средах.

Для решения этой задачи существуют десятки способов. Применение хромато-масс-спектрометра целесообразно в условиях, когда иначе осуществить анализ воды затруднительно, когда количество анализируемого газа относительно невелико, или, когда определение влаги представляет часть более сложной измерительной задачи.

## **Экспериментальная часть**

При проведении исследований был использован хромато-масс-спектрометр фирмы Agilent Technologies с квадрупольным масс-спектрометром 5975С и диффузионным насосом.

Прибор оборудован обогреваемым делителем потока (volatiles interface), обогреваемой петлей-дозатором и капиллярной колонкой DB-1.

В рамках проведённых исследований были разработаны два хроматографических режима, основные параметры которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Хроматографические режимы анализа влаги

Параметр	Изотермический режим	Режим программирования
Капиллярная хроматографическая колонка	DB-1 (30m•0,32mm•5μ)	
Газ-носитель	Гелий ( $\leq 2\text{ppm H}_2\text{O}$ )	
Начальный расход газа-носителя через колонку, мл/мин	2,5	1,1
Скорость увеличения расхода газа-носителя, мл/мин <sup>2</sup>	0	0,35
Конечный расход газа-носителя через колонку, мл/мин	2,5	1,6
Деление потока	1:36	1:85
Температура делителя потока, °C	280	
Исходная температура колонки, °C	180	70
Скорость увеличения температуры колонки, °C/мин	0	70
Конечная температура колонки, °C	180	175
Объём петли-дозатора, см <sup>3</sup>	0,1	
Температура петли-дозатора, °C	120	
Время дозирования, мин	0,01	
Время анализа, мин	1,0	3,0

Изотермический режим предназначен для определения воды в таких газах, как азот, воздух, аргон, метан, CO<sub>2</sub>. К преимуществам этого режима следует отнести малую продолжительность анализа (1 мин).

Режим программирования обеспечивает лучшее отделение H<sub>2</sub>O в более сложных матрицах, однако, время анализа при этом увеличивается.

С водой на колонке DB-1 плохо делится ряд веществ. К их числу относятся пропилен, пропан, диоксид серы, сероксид углерода. В непосредственной близости перед водой выходят C<sub>2</sub> углеводороды, закись азота, сероводород; после воды – диметиловый эфир.

Решить задачу анализа воды на фоне мешающих компонентов позволяет применение селективного масс-спектрометрического детектора (МСД). Высокая селективность МСД в отношении воды может быть достигнута посредством настройки прибора на регистрацию только заряженных частиц (избранных ионов) с массовым числом 18.

Далее представлены хроматограммы газов с различной влажностью, полученные в режиме программирования (вверху хроматограмма по общему ионному току (TIC), внизу – по избранным ионам (SIM)).

Рисунок 1. Хроматограмма примесей в азоте. Влажосодержание 1 600 ppm

На хроматограмме примесей диоксида углерода, аммиака и воды в азоте можно наблюдать хорошее разделение компонентов смеси, правильную форму пиков и высокую селективность МСД при регистрации сигнала воды по избранному иону.

Рисунок 2. Хроматограмма природного газа. Влажосодержание 8 400 ppm.

На хроматограмме природного газа по общему ионному току (вверху) видно, что пик воды плохо отделён от значительно большего по размеру пика пропана. В отсутствие селективного детектора анализ влаги в подобной смеси был бы затруднительным.

Рисунок 3. Хроматограмма диметилового эфира. Влажосодержание 2 400 ppm.

На хроматограмме диметилового эфира пик воды практически отделён от пика эфира. Селективность МСД в отношении  $H_2O$  весьма велика. Пик основного компонента на хроматограмме по избранному иону практически отсутствует.

Представленные хроматограммы показывают эффективность предлагаемого метода для анализа воды в чистых газах и различных газовых смесях. Высокая селективность детектора позволяет осуществлять анализ в присутствии различных мешающих компонентов. Во всех случаях вода имеет близкую к гауссовской форму пика.

Градуировку хромото-масс-спектрометра проводили по пяти точкам в изотермическом режиме. Характеристики средств градуировки приведены в Таблице 2.

Таблица 2. – Средства градуировки хромото-масс-спектрометра

№ точ.	Средство градуировки	$X_{H_2O}$ , ppm (mol)	$\Delta X_{H_2O}$ (k=2; P=0,95)		Способ аттестации
			ppm (mol)	относит.	
1	Бинарная газовая смесь $H_2O / N_2$ в баллоне под давлением	15,4	$\pm 0,6$	$\pm 4\%$	Весовой
2		49,8	$\pm 0,7$	$\pm 1,4\%$	
3		100,5	$\pm 0,7$	$\pm 0,7\%$	

4	Атмосферный воздух	5 300	$\pm 1\ 100$	$\pm 20\%$	Термогигрометр ИВА-6Н-Д $t = 25,6\ ^\circ\text{C}$ $W = 16,5\%$ $P = 768\ \text{мм рт. ст.}$
5	Искусственно увлажнённый воздух	30 000	$\pm 6\ 000$	$\pm 20\%$	Термогигрометр ИВА-6Н-Д $t = 26,7\ ^\circ\text{C}$ $W = 87,4\%$ $P = 767\ \text{мм рт. ст.}$

В области низких концентраций были использованы весовые смеси на основе азота. В области высоких концентраций использовался атмосферный воздух. Точка 5, отвечающая максимальному содержанию  $\text{H}_2\text{O}$  была получена при искусственном увлажнении воздуха до значений, близких к насыщению. Молярную долю воды в воздухе находили по его температуре, давлению и относительной влажности, которые определяли при помощи термогигрометра. Расчёт давления насыщенного пара воды производили по формуле Антуана с использованием констант приведённых в источнике [1].

В результате была получена градуировочная зависимость, приведённая на рис. 4. В качестве сигнала детектора принята высота хроматографического пика воды. Координатные оси даны в логарифмическом масштабе.

Рисунок 4. Градуировка по воде по пяти точкам.

Все экспериментальные точки хорошо ложатся на прямую вида  $X = a \cdot H + b$  (сплошная линия). Ни в одной из точек отклонение расчётного значения молярной доли воды от номинального не превысило 8%. Опыт был повторён несколько раз в разные дни с различным содержанием влаги в воздухе. Полученная градуировочная прямая хорошо воспроизводилась во всех случаях. Разброс значений её наклона (**a**) составил около 2 %, а свободного члена (**b**) около 10 %.

В режиме программирования также была получена линейная градуировочная характеристика со схожими параметрами воспроизводимости.

Таким образом, сигнал хромато-масс-спектрометра линейно связан с молярной долей воды в газовой пробе, причём эта линейность охватывает диапазон более трёх порядков величины.

Возможность одноточечной градуировки при этом ограничена наличием у градуировочной прямой свободного члена (**b**). Действительно, градуировка, проведенная через точку 4 (пунктирная линия) даёт удовлетворительное соответствие расчетных и номинальных значений влажности при содержании воды 100 ppm и более (расхождение не превышает 13 %). Однако, в точке 2 при 50 ppm это уже 25 %, а в точке 1 при 15 ppm – уже 90 %.

Область приемлемости одноточечной градуировки по воздуху заметно расширяется в сторону низких концентраций, если добиться прохождения градуировочной зависимости как можно ближе к началу координат.

В ходе эксперимента выяснилось, что величина свободного члена (**b**) градуировочной прямой связана с режимом дозирования пробы. Оптимальный режим отвечает ситуации, когда во время дозирования петля-дозатор промывается объёмом газа-носителя, соответствующим  $1 \div 2$  объёма петли. При этом в изотермическом режиме величину (**b**) удалось снизить практически до нуля. Расхождение расчётного (одноточечная градуировка по воздуху) и номинального содержания воды не превысило 15% во всём измерительном диапазоне. В режиме программирования свободный член (**b**) также значительно уменьшился, однако, полностью избавиться от него не удалось. При градуировке по воздуху в режиме программирования расхождение расчетного и номинального влагосодержания в точке 15 ppm (аналогичной точке 1 на рис.4) составило  $30 \div 35\%$ .

Выяснение причин обнаруженного эффекта выходит за рамки данной работы. Можно лишь предположить, что явление обусловлено взаимодействием газообразной  $H_2O$  с внутренней поверхностью петли-дозатора и с неподвижной фазой колонки, причём это взаимодействие существенно даже при температурах  $120 \div 180$  °С.

Таким образом, показано, что градуировочная характеристика по воде линейна от 15 до 30 000 ppm. Подобран режим дозирования пробы, обеспечивающий возможность градуировки по одной точке во всём линейном диапазоне. Показана возможность использования атмосферного воздуха в качестве средства градуировки.

Неопределённость измерения [2] воды в газовых средах предлагаемым способом складывается из ряда составляющих. Основной составляющей является неопределённость аттестации молярной доли воды в градуировочной смеси. Термогигрометр ИВА-6 позволяет производить измерения с точностью от 10 до 30 % в зависимости, главным образом, от влажности воздуха. Бинарные смеси, приготовленные весовым способом, обеспечивают неопределённость не выше 4 %. Другим существенным источником неопределённости является установление равновесия

газообразной воды с различного рода поверхностями газовых коммуникаций или с датчиками термогигрометра. Некоторые из этих равновесий могут устанавливаться весьма длительное время, и не всегда существует уверенность в том, что процесс завершён. Эту неопределённость можно оценить от 5 до 15 %, причём она тем выше, чем ниже содержание влаги в пробе.

Таким образом, в зависимости от используемых средств градуировки и влажности пробы неопределённость измерения молярной доли воды в газах варьируется от 10 до 25 %.

### **Заключение**

В ходе проведённых исследований была продемонстрирована пригодность хромато-масс-спектрометра для измерения влагосодержания в различных газовых средах.

Диапазон измерений от 15 до 30 000 ppm (более трёх порядков величины).

Для измерений с точностью на уровне 20÷25% показана приемлемость одноточечной градуировки прибора по атмосферному воздуху.

Для более точных измерений показана приемлемость градуировки с использованием бинарных смесей, приготовленных весовым способом.

Хромато-масс-спектрометрический метод анализа воды в газах может быть рекомендован для случаев, когда иной способ анализа затруднителен, когда в распоряжении имеется сравнительно небольшой объём пробы, или, когда определение воды является элементом комплексной измерительной задачи, решаемой при помощи хромато-масс-спектрометра.

### **Литература**

1. NIST Chemistry WebBook, SRD 69. Water. URL: <http://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7732185&Units=SI&Mask=4> (дата обращения: 17.04.2017).
2. ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ. Руководство по выражению неопределённости измерения. Часть 3. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) (IDT)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
БУФЕРНЫХ РАСТВОРОВ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ВЫСОКОЧИСТЫХ  
ВЕЩЕСТВ, ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИХ В КАЧЕСТВЕ ЭТАЛОНОВ  
СРАВНЕНИЯ В СОСТАВЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО  
ЭТАЛОНА ПОКАЗАТЕЛЯ pH АКТИВНОСТИ ИОНОВ ВОДОРОДА  
В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ГЭТ 54-2011

В.И. Добровольский, В.А. Звездина, С.В. Прокунин, А.Н. Щипунов

*ФГУП «ВНИИФТРИ»*

Доклад посвящен исследованию метрологических характеристик буферных растворов приготовленных из высокочистых веществ, и оценки пригодности их использования в метрологических работах, проводимых на Государственном первичном эталоне показателя pH активности ионов водорода в водных растворах ГЭТ 54-2011.

Измерения в области pH-метрии являются неотъемлемой частью при контроле состава водных растворов и других жидких сред. Важным является не только определить уровень концентрации ионов водорода, но и знать, с какой точностью определена данная величина. Следует отметить, что развитие аналитического приборостроения позволило создать высокоточные средства измерений, которым требуется метрологическое обеспечение на уровне  $\pm 0,006$  pH. Такие средства измерений применяются практически во всех отраслях промышленности, где необходимо измерять значение водородного показателя (pH) с высокой точностью, а именно в медицине, фармацевтике, сельском хозяйстве, экологии, научных исследованиях, при сертификации различной продукции.

Согласно [1], значение pH включает в себя активность одного вида ионов и, следовательно, не может быть измерено непосредственно.

Величина pH соответствует отрицательному десятичному логарифму активности ионов водорода  $a_H$  в растворе:

$$pH = -\log(a_H) \quad (1)$$

или в терминах концентраций:

$$pH = -\log(c_H y_H / c^0) \quad (2)$$

$$pH = -\log(m_H \gamma_H / m^0) \quad (3)$$

где  $c_H$  – молярная концентрация ионов водорода, моль·дм<sup>-3</sup>;  
 $c^0$  – молярная концентрация ионов водорода в стандартном состоянии, равная 1 моль·дм<sup>-3</sup>;

$m_H$  – моляльность ионов водорода, моль·кг<sup>-1</sup>;  
 $m^0$  – моляльность ионов водорода в стандартном состоянии, равная 1 моль·кг<sup>-1</sup>;

$u_H$ ,  $\gamma_H$  – коэффициенты активности ионов водорода в двух системах выражения концентрации.

Для хранения, воспроизведения и передачи единицы рН во ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан эталон, утвержденный в 2011 году Росстандартом в качестве государственного первичного эталона под регистрационным номером ГЭТ 54-2011 [2].

Передачу единицы от ГЭТ 54-2011 выполняют с помощью специальных растворов (рабочих эталонов рН), совокупность значений рН которых при разных температурах образует ряд реперных точек шкалы рН. Все эти растворы являются буферными, то есть обладают способностью сохранять практически постоянной концентрацию ионов водорода при добавлении небольших количеств кислоты или основания. В России для первичного метода определения рН используют буферные растворы, описанные в ГОСТ 8.134 ГСИ «Метод измерений рН на основе ячеек Харнеда» [3].

Следует также отметить, что во всех первичных измерениях рН в качестве измерительного электрода используют водородный электрод, который получают путем барботирования газообразного водорода при атмосферном давлении 101325 Па через раствор с концентрацией ионов водорода 1 моль/л с погруженной в него платиновой пластиной, покрытой платиновой чернью.

Свойства электрохимической системы «электрод - электролит» в значительной степени зависят от наличия примесей – даже незначительные количества посторонних веществ (как органических, так и неорганических) легко адсорбируются в межфазном слое и существенно искажают его свойства [4]. Поэтому к чистоте химических веществ в электрохимических измерениях предъявляются высокие требования. Также необходимо максимально возможно снизить попадание примесей на поверхность электрода до и во время измерений. Измерения следует проводить в ячейках из кварцевого стекла, фторопласта или других материалов, не выделяющих примесей в исследуемую систему. Подготовительные операции должны включать тщательную очистку применяемых реактивов, многократную перегонку растворителей, перекристаллизацию и прокаливание солей. Во многих случаях недопустим контакт измеряемой системы с воздухом из-за наличия в нем следов углекислого газа, поэтому измерения проводят в атмосфере водорода или инертного газа (аргона, гелия и др.). При этом необходимо следить за полнотой вытеснения воздуха из системы. Как буферный раствор, так и газ должны быть тщательно очищены от посторонних

примесей. Устанавливаемое в этих условиях значение потенциала воспроизводимо и стабильно во времени. Малейшие примеси соединений ртути или мышьяка, а также сероводорода и ряда других соединений резко ухудшают стабильность и «отравляют» электрод.

При опытной эксплуатации ГЭТ 54-2011 было отмечено заметное смещение значений рН при одинаковых массах навесок веществ используемых для приготовления буферного раствора - эталона сравнения. Следует отметить, что данное смещение наблюдалось только при смене партии химических реактивов, из которых изготавливались эталоны сравнения. Был сделан вывод, что данное смещение происходит из-за влияния примесей находящихся в химических веществах, из которых изготавливаются эталоны сравнения.

В ходе предварительных экспериментов, результаты которых представлены в таблице 1 на примере одной партии химического вещества, было установлено, что для демпфирования значений рН при эксплуатации ГЭТ требуется предварительная очистка химических веществ, используемых для приготовления эталонов сравнения, которые используются как расходный материал в ГЭТ 54-2011 [5,6].

Таблица 1 – Зависимость значения водородного показателя фталатного буферного раствора от чистоты вещества, входящего в его состав при  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Наименование вещества	Значение рН 5%-го раствора гидрофталата калия
Гидрофталат калия марки «ч.д.а.» до очистки	$3,899 \pm 0,004$
Гидрофталат калия марки «ч.д.а.» после очистки методом однократной перекристаллизации	$4,004 \pm 0,004$

Как видно из таблицы, величина водородного показателя фталатного буферного раствора до его очистки составляет 3,899 рН при  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После проведения однократной перекристаллизации данная величина при той же температуре составила 4,004, что хорошо согласуется с [3,7] и показывает влияние примесей на величину рН. Расхождение полученных результатов составляет 0,105 рН, что соответствует погрешности рабочих эталонов рН 3-го разряда.

Основной задачей исследования, являлось получение чистых химических веществ, для изготовления эталонов сравнения, используемых для приготовления буферных растворов, которые обладают стабильными и достоверными метрологическими характеристиками при воспроизведении

величины водородного показателя, с точностью, заявленной при утверждении государственного первичного эталона рН.

Перечень химических веществ, который был использован при создании эталонов сравнения в соответствии с ГОСТ 8.120 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений рН», [5] приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень химических веществ, используемый при создании эталонов сравнения рН

№ п/п	Наименование вещества	Химическая формула	Диапазон воспроизведения рН при температуре от 5 до 80 °С
1	Калий тетраоксалат	$\text{KH}_3(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	от 1,668 до 1,766
2	Калий гидротартрат	$\text{KHC}_4\text{H}_4\text{O}_6$	от 3,564 до 3,610
3	Калий фосфорнокислый однозамещенный	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	от 6,859 до 7, 500
4	Натрий фосфорнокислый двузамещенный	$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	от 6,859 до 7, 500
5	Натрий тетраборат	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	от 8,885 до 9,395
6	Натрий углекислый кислый	$\text{NaHCO}_3$	от 9,730 до 10, 245
7	Кальция гидроксид	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	от 10,980 до 13,207

Эталонные сравнения получали либо очисткой, либо синтезом химических веществ с последующей доочисткой, если это необходимо. После получения очищенных химических веществ следовала стадия изготовления навесок порошков, согласно массам приведенных в ГОСТ 8.135-2004 [6].

Полученные навески помещали в специально подготовленную тару. При выборе конструкционного материала для тары, в которой хранились эталонные сравнения, руководствовались принципом минимального поступления примесей из материала тары.

Заключительный этап работы был посвящен определению величины водородного показателя полученных эталонов сравнения на ГЭТ 54-2011.

Процедура определения значений рН эталонных буферных растворов, основана на измерениях электродвижущей силы (ЭДС) в трех ячейках Харнеда:

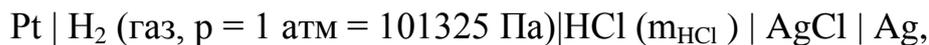
$\text{Pt} | \text{H}_2 (\text{газ}, p = 1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па}) | \text{ЭБР}, \text{Cl}^- (m_{\text{Cl}}) | \text{AgCl} | \text{Ag}$   
при трех разных значениях молярной концентрации хлорид-ионов  $m_{\text{Cl}} = 0,005 \text{ моль/кг}$ ;  $0,010 \text{ моль/кг}$  и  $0,015 \text{ моль/кг}$ .

ЭДС  $E$ , мВ, ячейки определялось по уравнению (4):

$$E = E^0 - k \cdot \lg \left( \frac{m_H \cdot m_{Cl} \cdot \gamma_H \cdot \gamma_{Cl}}{(m^0)^2} \right) \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент наклона,  $k = \frac{R \cdot T \cdot \ln 10}{F}$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная  $R = 8,3144621$ , Дж/(моль·К);  $T$  – температура буферного раствора, К;  $F$  – постоянная Фарадея  $F = 96485,3383$ , Кл/моль;  $m_H$  – моляльная концентрация ионов водорода, моль/кг;  $\gamma_H$  – коэффициент активности ионов водорода, моль/кг;  $m_{Cl}$  – моляльная концентрация ионов хлора, моль/кг;  $\gamma_{Cl}$  – коэффициент активности ионов хлора, моль/кг;  $E^0$  – стандартная разность потенциалов ячейки с водородным и хлорсеребряным полуэлементами, мВ (по определению, стандартный потенциал водородного электрода равен нулю при всех значениях температуры, поэтому  $E^0$  соответствует стандартному потенциалу хлорсеребряного электрода), зависимость которой от температуры представлена в [3].

Значение величины  $E^0$  определялось на основе измеренных ЭДС ячеек:



где  $m_{\text{HCl}}$  – моляльная концентрация соляной кислоты  $\text{HCl} = 0,01$  моль/кг,

и вычислялось по уравнению (4), учитывая, что  $\gamma_H \gamma_{Cl} = \gamma_{\pm}^2$ , где  $\gamma_{\pm}$  – средний ионный коэффициент активности соляной кислоты  $\text{HCl}$ , зависящий от концентрации.

Уравнение (4) приводилось к следующему виду (5):

$$-\lg \left( \frac{m_H \cdot \gamma_H \cdot \gamma_{Cl}}{m^0} \right) = \frac{E - E^0}{k} + \lg \left( \frac{m_{Cl}}{m^0} \right) \quad (5)$$

Значение величины  $-\lg \left( \frac{m_H \cdot \gamma_H \cdot \gamma_{Cl}}{m^0} \right) \equiv -\lg a_{\text{H}^+ \cdot \text{Cl}^-}$  находилось для трех значений моляльной концентрации хлорид-ионов  $m_{Cl}$ . По этим точкам

строился график в координатах  $-\lg \left( m \frac{m_H \cdot \gamma_H \cdot \gamma_{Cl}}{m^0} \right) = f(a_{\text{Cl}^-})$  и проводилась экстраполяция к  $m_{Cl} \rightarrow 0$ .

После этого вычислялось значение рН эталона сравнения по формуле (6):

$$pH = -\lg(a_{\text{H}^+} \cdot \gamma_{\text{Cl}^-})_{m_{Cl} \rightarrow 0} + \lg(\gamma_{\text{Cl}^-})_{m_{Cl} \rightarrow 0}, \quad (6)$$

где ионный коэффициент активности хлорид-ионов  $\gamma_{Cl}$ , моль/кг, который вычислялся по условию Бейтса-Гуттенгейма с использованием формулы (7):

$$\lg \gamma_{Cl} = - \frac{A \sqrt{\frac{I}{m^0}}}{1 + 1,5 \cdot \sqrt{\frac{I}{m^0}}}, \quad (7)$$

где  $I$  – ионная сила раствора, моль/кг;  $A$  – константа Дебая-Хюккеля .

Выражение (7) справедливо, когда  $I < 0,1$  моль/кг.

Структурная схема установки, реализующей первичный метод измерений рН, представлена в [3].

Из полученного эталона сравнения приготавливались буферные растворы, в которые добавлялись навески хлористого натрия, чтобы содержание хлорид-ионов соответствовало молярным концентрациям 0,005 моль/кг, 0,01 моль/кг, 0,015 моль/кг в растворе.

После этого проводилось измерение потенциалов хлорсеребряных электродов при температуре 25 °С на трех ячейках Харнеда (№ 1, № 2, № 3). В измерительные ячейки устанавливались платинированные водородные и хлорсеребряные электроды [8-10]. Измерялось ЭДС ячеек Харнеда, поочередно подключая измеритель напряжения к водородному и хлорсеребряному электродам каждой из трех ячеек. Показания записывались в журнал измерений. Измерения проводились с интервалом 5 мин в течение не менее трех часов для каждого электрода сравнения.

Измеренные значения напряжения принимались в качестве значений ЭДС ячеек, путем усреднения полученных результатов.

Для подтверждения метрологических характеристик полученных эталонов сравнения были проведены три последовательных эксперимента в одинаковых условиях. Для проверки временной стабильности водородного показателя, интервал между экспериментами подбирался так, чтобы охватить весь срок годности полученных эталонов сравнения.

В качестве примера приведены результаты эксперимента № 3, которые представлены на рисунке. В таблице 3 представлены сводные результаты по исследованию метрологических характеристик эталонов сравнения всех проведенных экспериментов.

На каждом графике представлена величина коэффициента достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) - это значение, которое характеризует точность аппроксимации и показывает, насколько точно теоретическое распределение описывает реальное распределение. Его значение может лежать в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе  $R^2$  к 1, тем точнее модель описывает имеющиеся данные. Как видно из представленных данных, уровень величины  $R^2$  не опускается ниже 0,9031, что свидетельствует о хорошем соответствии трендовой модели исходным данным.

Таблица 3 – Результаты экспериментов по исследованию метрологических характеристик эталонов сравнения при  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Наименование эталона	Среднее значение ЭДС в ячейках в эксперименте № 3, В			$pH_{\text{эксп.}}$			$pH_{\text{уст.}}$ [3,7]
	Ячейка № 1	Ячейка № 2	Ячейка № 3	Эксперимент № 1	Эксперимент № 2	Эксперимент № 3	
Калий тетраоксалат	0,463406	0,445763	0,435430	$1,679 \pm 0,004$	$1,680 \pm 0,004$	$1,680 \pm 0,004$	1,680
Калий гидротартрат	0,572669	0,554526	0,543947	$3,557 \pm 0,004$	$3,556 \pm 0,004$	$3,557 \pm 0,004$	3,557
Калий фосфорнокислый однозамещенный и Натрий фосфорнокислый двузамещенный	0,770002	0,751933	0,741226	$6,864 \pm 0,004$	$6,864 \pm 0,004$	$6,864 \pm 0,004$	6,865
Натрий тетраборат	0,904821	0,887017	0,876591	$9,178 \pm 0,004$	$9,179 \pm 0,004$	$9,179 \pm 0,004$	9,180
Натрий углекислый кислый	0,956383	0,938197	0,927522	$10,011 \pm 0,004$	$10,012 \pm 0,004$	$10,011 \pm 0,004$	10,012
Гидроокись кальция	1,099824	1,081274	1,070229	$12,445 \pm 0,006$	$12,447 \pm 0,006$	$12,447 \pm 0,006$	12,450

В представленной таблице величина водородного показателя  $pH_{\text{эксп}}$  во всех экспериментах лежит в допустимых интервалах, что подтверждает временную стабильность для всех эталонов сравнения.

При сравнении полученных результатов  $pH_{\text{эксп.}}$  с  $pH_{\text{уст.}}$  [3,7] видно, что полученные значения совпадают в пределах неопределенности ГЭТ 54-2011. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о правильном подходе к выбору способа создания эталонов сравнения, входящих в состав ГЭТ 54-2011.

Для изготовления эталонов сравнения следует использовать химические реактивы только после их «очистки».

## Литература

1. Р. Бейтс. Определение рН. Теория и практика /Издательство «Химия», 1972, стр. 247-251;
2. <http://www.gos-etalon.ru/DB/com/index.htm?RU,ETALON>;
3. ГОСТ 8.134-2014 Государственная система обеспечения единства измерений. Метод измерений рН на основе ячеек Харнеда;
4. Багоцкий В.С. Основы электрохимии. – М.: Химия, 1988. – 400 с.: ил.;
5. ГОСТ 8.120-2014 Государственная поверочная схема для средств измерений рН.
6. ГОСТ 8.135-2004 Государственная система обеспечения единства измерений. Стандарт-титры для приготовления буферных растворов - рабочих эталонов рН 2-го и 3-го разрядов. Технические и метрологические характеристики. Методы их определения.
7. R.P. Buck et al. Measurement of pH. Definition, Standards, and Procedures (IUPAC Recommendations 2002). Pure Appl. Chem., Vol. 74, No. 11, 2002, pp. 2169–2200.
8. Глаздов А.А., Прокунин С.В. Опыт применения новых хлорсеребряных электродов изготовленных для Государственного первичного эталона показателя рН / Метрология в XXI веке. Доклады IV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов, 2 марта 2016, Менделеево. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2016. С. 107 – 112.
9. Глаздов А.А., Прокунин С.В., Апрелев А.В. Изучение стабильности потенциалов хлорсеребряных электродов, изготовленных для государственного первичного эталона показателя рН / Альманах современной метрологии, 2016, №6, С. 59-63.
10. В.И. Добровольский, С.В. Прокунин, И.В. Морозов, А.А. Глаздов. Исследование метрологических характеристик хлорсеребряных электродов Государственного первичного эталона показателя рН активности ионов водорода в водных растворах ГЭТ 54 – 2011 Измерительная техника. 2016. № 9. С. 68-70.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО СПЕЦИАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В АЭРОДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ»

Ю.А. Кустиков, Д.Н. Козлов, О.А. Пинчук, Ю.А. Крамаренко

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».*

Взвешенные частицы в воздухе (аэрозоли) являются вторым по опасности после озона фактором, влияющим на здоровье человека. Это явилось причиной быстрого роста парка средств измерения массовой концентрации аэрозолей.

В период с 2000 по 2003 гг. во ВНИИМ была создана установка высшей точности УВТ 105-А-2003, а в 2003 г. на базе УВТ 105-А-2003 был утвержден государственный первичный специальный эталон единицы массовой концентрации частиц в аэродисперсных средах ГЭТ 164-2003. С 2003 г. парк средств измерений массовой концентрации частиц в воздушных средах претерпевает значительные изменения по своему структурному и количественному составу. В первую очередь этому способствовало введение в действие законов Российской Федерации № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений», № 96-ФЗ «Об охране окружающей среды», № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», а также появление в 2010 г. новых национальных гигиенических нормативов, устанавливающих требования к предельно допустимым концентрациям загрязняющих веществ (в том числе – взвешенных частиц) в атмосферном воздухе населенных мест.

Особенностью новых нормативов является то, что в них впервые сформулированы требования к предельно допустимым концентрациям респираторных фракций аэрозолей – РМ<sub>2.5</sub> и РМ<sub>10</sub>. Таким образом, в РФ возникла необходимость применения новых типов анализаторов аэрозолей, оснащенных преобразователями фракционного состава и осуществляющих разделение частиц по фракциям, обеспечивающих контроль не только предельно допустимых концентраций всех взвешенных частиц, но и концентраций отдельных фракций частиц (РМ<sub>2.5</sub>, РМ<sub>10</sub>).

Необходимость решения задачи метрологического обеспечения измерителей массовой концентрации новых типов обусловила постановку работы по совершенствованию комплекса аппаратуры в составе эталона, которая завершилась утверждением государственного первичного специального эталона ГЭТ 164-2016.

В основу государственного первичного эталона ГЭТ 164 положены два метода измерений: гравиметрический метод измерения массовой концентрации взвешенных частиц и радиоизотопный метод измерения.

Гравиметрический метод измерения, который является первичным методом, в том числе, и по определению документов Консультативного комитета по количеству вещества ВІРМ, служит для воспроизведения единицы массовой концентрации взвешенных частиц.

Радиоизотопный метод основан на поглощении  $\alpha$ -излучения слоем аэрозольных частиц, предварительно осажденных на фильтре, и служит для передачи единицы массовой концентрации взвешенных частиц.

Сравнение метрологических характеристик первичных эталонов единицы массовой концентрации взвешенных частиц показывает, что усовершенствованный эталон обладает расширенной неопределенностью не хуже, чем национальные эталоны других стран, однако обладает более широким диапазоном измерения и нацелен на решение большего числа измерительных задач.

В настоящее время создана группа рабочих эталонов, обеспечивающих передачу единицы массовой концентрации в различных регионах Российской Федерации.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника», № 12, 2017 г., стр. 37- 40.

## НОВОЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДА В ТВЁРДОЙ ПРОБЕ

Л.А. Конопелько<sup>1</sup>, А.М. Полянский<sup>2</sup>, В.А. Полянский<sup>3</sup>, Ю.А. Яковлев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

<sup>2</sup>ООО «НПК ЭПТ», <sup>3</sup>ИПМаш РАН

Водород является самым опасным элементом для всех конструкционных материалов. Наличие его внутри материалов приводит к металлургическим дефектам, снижению усталостной прочности, пластичности и трещиностойкости, индуцирует развитие коррозии, стресс-коррозии, хладноломкости. Статистика техногенных аварий в нефтегазовом комплексе показывает, что в 80% случаев разрушение конструкций спровоцировал растворенный в металле водород. Для всех групп металлов и сплавов его концентрация нормирована стандартами. Иногда задают "норму" и предельно допустимую концентрацию.

Самая острая проблема современности состоит в использовании высокой доли вторичного металла, что приводит к повышенным концентрациям водорода в готовой продукции. Основной производитель чёрных металлов – Китай – уже использует при производстве сталей высокий процент металлолома. Евросоюз принял директиву о 100% утилизации вторичных металлов на своей территории до 2025 года. Это означает, что доля металлолома в европейских сталях может составить 70 % (при современной норме – не более 7 %). Из-за исчерпания рудных запасов по некоторым жаропрочным сплавам доля вторичного металла уже сейчас составляет 100 %.

Россия интегрирована в мировой процесс разделения труда. Вопрос согласования СИ и стандартов становится определяющим в обеспечении безопасности. Водород является единственным элементом, по которому отсутствует согласованная нормативная база. Международные сличения и исследования, проведенные по европейской рамочной программе, показали расхождение до семи раз! между аттестованным и реальным содержанием водорода в эталонах различных производителей.

Основными проблемами являются:

\*разнородность материалов, необходимых для создания эталонной базы;

\*широкий диапазон и чрезвычайно низкие значения нормированных концентраций водорода, которые составляют от 0,04 [млн-1] для алюминиевых сплавов до 30 [млн-1] для титановых сплавов;

\*неспособность большинства имеющихся на рынке СИ обеспечить измерения во всем диапазоне концентраций водорода и для всей

номенклатуры сплавов, необходимых для функционирования современной промышленности.

Мы разрабатываем отечественную метрологическую базу, средства и методы измерения содержания водорода на основе нового эталона потока водорода в вакуум и универсального масс-спектрометрического метода измерения концентраций водорода. Быстрое решение существующих проблем будет означать лидерство РФ в обеспечении надёжного и безопасного функционирования объектов ОПК и объектов гражданского назначения, особенно в условиях крайнего Севера, позволит осуществить импортозамещение СИ в этой критически важной области, улучшить качество существующих материалов и создать новые материалы шестого технологического уклада. С 2000 года выпускается серийно отечественный универсальный масс-спектрометрический анализатор водорода АВ-1, который может стать основой для быстрого внедрения разрабатываемых технологий.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» № 12 2017 г., стр. 46 – 50.

## РАЗРАБОТКА СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА УГЛЕРОДА НОВОГО ТИПА

Я.К. Чубченко<sup>1</sup>, Л.А. Конопелько<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»,

<sup>2</sup>ФГАОУВО СПбНИУ ИТМО

В последние десятилетия важной задачей в области экологии, медицины, энергетики, криминалистики, фармацевтики, геохимии, пищевой промышленности является определение изотопного состава углерода.

Изотопный анализ помогает решать такие задачи, как обнаружение язвенной болезни [1], допинг-контроль [2], изучение геохимического цикла углерода [3], определение месторождения и качества нефти и газа [4,5], контроль качества пищевой продукции [6,7,8,9], идентификация происхождения наркотических веществ [10], контроль качества медикаментов [11].

Быстрое развитие отечественного парка аналитических приборов определения изотопного состава углерода в газообразных средах невозможно без разработки и выпуска нового типа отечественных стандартных образцов – газовых смесей в баллонах под давлением, прослеживаемых к международному эталону VPDB.

В работе выполнен анализ существующих методов определения изотопного состава углерода, даны рекомендации по разработке нового типа стандартных образцов  $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ , сформулированы основные требования к погрешности их аттестации.

### Литература

- 1 Graham D.Y. et al. *Campylobacter pylori* detected noninvasively by the  $^{13}\text{C}$ -urea breath test. *The Lancet* 1987, p. 1174.
- 2 Saudan C. et al. Testosterone and doping control. *Br J Sports Med*, 2006, 40, p. 21.
- 3 Prosenjit Ghosh, Willi A. Brand. Stable isotope ratio mass spectrometry in global climate change research. *International Journal of Mass Spectrometry* 228 (2003) 1–33.
- 4 D.D. Coleman, "Geochemical Fingerprinting: Identification of Storage Gas Using Chemical and Isotopic Analysis," *Underground Storage of Natural Gas - Theory and Practice*, M. R. Tek (editor), Gulf Publishers, 1989.
- 5 Malvin Bjarøy, Keith Hall Janine Jumeau. Stable carbon isotope ratio analysis on single components in crude oils by direct gas

- chromatography—isotope analysis. Trends in Analytical Chemistry. Volume 9, Issue 10, November–December 1990, Pages 331-337.
- 6 ГОСТ 31714-2012 «Соки и соковая продукция. Идентификация. Определение стабильных изотопов углерода методом масс-спектрометрии».
  - 7 ГОСТ Р 55460-2013 «Продукция алкогольная. Идентификация. Метод определения отношения изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  диоксида углерода в игристых винах и напитках брожения».
  - 8 ГОСТ 32710-2014 «Продукция алкогольная и сырье для ее производства. Идентификация. Метод определения отношения изотопов  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  спиртов и сахаров в винах и сусле».
  - 9 Antje Schellenberg et.al. Multielement stable isotope ratios (H, C, N, S) of honey from different European regions. Food Chemistry 121 (2010) 770–777.
  - 10 Э.М. Галимов и др. Идентификация географического места происхождения наркотических веществ на основе изотопного анализа углерода и азота. Масс-спектрометрия 1(1), 1 - 8 (2004).
  - 11 J. P. Jasper, B.J. Westenberger, J.A. Spencer, L.F. Buhse, and M. Nasr, "Stable Isotopic Characterization of Active Pharmaceutical Ingredients," Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, Volume 35, Issue 1, April 2004, Pages 21-30.

Материалы доклада опубликованы в журнале «Измерительная техника» № 12 2017 г., стр. 50 – 53.

## Секция № 04 «Теплофизические измерения»

А.И. Походун *ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»* Переопределение кельвина и перспективы совершенствования Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне выше 273 К

### ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕ КЕЛЬВИНА И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДИАПАЗОНЕ ВЫШЕ 273 К

А.И. Походун

*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»*

Рассматриваются состояние и перспективы дальнейшего совершенствования Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3273 К.

Основными задачами, которые необходимо решить в процессе совершенствования первичного эталона, являются следующие:

- обеспечение способности воспроизводить кельвина в диапазоне выше 1235 К в соответствии с его новым определением, которое может вступить в силу в 2019 году;
- повысить точность воспроизведения кельвина в 1,5-2 раза;
- расширить диапазон воспроизведения единицы температуры до 3473 К.

Рассмотрены пути совершенствования средств для реализации Международной температурной шкалы 1990 года в диапазоне от 273,15 К до 1235 К.

В 2008 году ВНИИМ им. Д. И. Менделеева была выполнена НИР «Разработка концепции развития системы метрологического обеспечения температурных измерений» [1]. В рамках этой работы были проанализированы состояние и перспективы развития термометрии, ее метрологическое обеспечение, а также требования отраслей отечественной промышленности и науки к измерениям температуры в период с 2008 до 2018 года. Результаты данного анализа были использованы для планирования основных направлений развития термометрии и ее метрологического обеспечения. Основным элементом планирования явилось формирование направлений дальнейшего совершенствования государственных первичных эталонов единицы температуры, не уступающих по своему научно-техническому уровню и метрологическим характеристикам лучшим зарубежным аналогам.

В нашей стране единство измерений температуры обеспечивается двумя государственными первичными эталонами, воспроизводящими Международную температурную шкалу 1990 года (МТШ-90) [2].

В диапазоне от 0,3 до 273,15 К шкала МТШ-90 воспроизводится Государственным первичным эталоном единицы температуры ГЭТ 35-2010, хранящемся во ВНИИФТРИ.

В диапазоне выше 273,15 К МТШ-90 воспроизводится Государственным первичным эталоном единицы температуры ГЭТ 34-2007, хранящемся во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.

Основной задачей совершенствования эталонов является обеспечение возможности воспроизведения кельвина в соответствии с его новым определением, принятие которого ожидается в 2019 году на Генеральной конференции по мерам и весам.

Кроме этой главной задачи, были скорректированы требования к метрологическим характеристикам эталона ГЭТ 34-2007 с учетом современных и перспективных требований науки и промышленности: расширение верхнего диапазона воспроизведения единицы температуры до 3473 К и повышение точности эталона в 1,5 - 2 раза.

В основу работ по модернизации первичных эталонов ГЭТ 35-2010 и ГЭТ 34-2007 были положены результаты исследований национальных метрологических институтов, принимавших участие в подготовке нового определения кельвина, и рекомендации, изложенные в материалах Консультативного комитета по термометрии и его рабочими группами, принимавшими участие в решении этой проблемы.

В соответствии с рекомендацией Консультативного комитета по термометрии кельвин будет определяться через фиксированное значение константы Больцмана [3]. Ведущие национальные метрологические институты выполнили большой объем работ по определению точного значения этой константы. Для этого был использован ряд термометров, реализующих различные методы первичной термометрии, в том числе: газовый термометр постоянного объема, акустический газовый термометр, газовый термометр по диэлектрической проницаемости, газовый термометр по показателю преломления, шумовой термометр, термометр по доплеровскому уширению спектральных линий [4].

Следующие результаты выполненных исследований, сформулированные в докладе рабочей группы по переопределению кельвина, являются принципиально важными для модернизации эталонов [4]:

1) Новое определение кельвина не влияет непосредственно на статус МТШ-90 или ВНТШ-2000, однако имеются значительные преимущества для измерения термодинамической температуры (акустический газовый

термометр), особенно – ниже 20 К и выше 1300 К (радиационный термометр), где первичные термометры могут обеспечить более низкую неопределённость, чем доступную в настоящее время по МТШ-90.

2) Наиболее точные измерения температуры в основном диапазоне – приблизительно от 13 до 1235 К – будут по-прежнему прослеживаться к эталону единицы температуры через платиновые термометры сопротивления, откалиброванные по МТШ-90.

3) В будущем, по мере развития методов первичной термометрии, способствующих уменьшению неопределенности, они будут использоваться все шире и смогут, в некоторых диапазонах, постепенно заменить Международные температурные шкалы в качестве основы температурных измерений.

На основании полученных результатов были сделаны выводы о том, что основное внимание должно быть сосредоточено на создании акустического газового термометра для диапазона температур ниже 20 кельвинов и эталонного радиационного термометра для диапазона выше 1235 К.

В диапазоне от 13 К до 1235 К целесообразно модернизировать аппаратуру, воспроизводящую единицу температуры в соответствии со шкалой МТШ-90. При этом существует перспектива дальнейшего совершенствования акустического газового термометра с целью его использования до 273,16 К. В соответствии со специализацией метрологических институтов создание эталонного акустического термометра относится к компетенции ФГУП «ВНИИФТРИ», а ответственность за создание эталонного радиационного термометра лежит на ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» (рисунок 1).

В период с 2015 по 2016 годы во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в соответствии с ведомственной целевой программой «Проведение фундаментальных исследований в области метрологии, разработки государственных (в том числе первичных) эталонов единиц величин» была выполнена НИР «Кельвин». В рамках этой работы был создан экспериментальный образец государственного первичного эталона единицы температуры, экспериментальные исследования которого позволили определить основные научно-технические решения, обеспечивающие выполнение основных задач модернизации эталона ГЭТ 34-2007:

- воспроизведение единицы температуры методом первичной термометрии в соответствии с ее новым определением в диапазоне выше 1235 К;
- повышение в 1,5 - 2 раза точности ГЭТ 34-2007;

- расширение диапазона воспроизведения и передачи единицы температуры до 3473 К.

Принимая во внимание тот факт, что в обозримом будущем в диапазоне от 273,16 до 1235 К для воспроизведения единицы температуры альтернативы платиновому термометру сопротивления нет, представляется целесообразным усовершенствование аппаратуры ГЭТ 34-2007, используемой для реализации МТШ-90 в указанном диапазоне.

В частности, необходима модернизация аппаратуры, используемой для реализации реперных точек МТШ-90. Это обусловлено отсутствием возможности морально и физически устаревших установок, используемых для реализации реперных точек, обеспечить требуемую точность и стабильность поддержания температуры, а также однородность температурного поля в рабочем пространстве печей.

Кроме этого, в течение многих лет в нашей стране отсутствовала возможность оценки нелинейности мостов, используемых для измерения сопротивления эталонных платиновых термометров при их градуировке.

Обе эти проблемы являются актуальными не только для воспроизведения единицы температуры, но и для ее передачи.

В настоящее время поверочные лаборатории территориальных органов Росстандарта оснащены импортным оборудованием, ремонт которого чрезвычайно дорог и требует больших затрат времени.

Нерешенной проблемой является также оценка нелинейности мостов, входящих в состав вторичных и рабочих эталонов, используемых при передаче единицы температуры.

Проблема модернизации установок, используемых для реализации реперных точек в Государственном первичном эталоне единицы температуры ГЭТ 34-2007, а также во вторичных и рабочих эталонах отечественных поверочных и калибровочных лабораторий была решена совместными усилиями специалистов ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и ОАО НПП «Эталон» (г. Омск).

Этими предприятиями были созданы печи (рисунок 2):

- ПРТ50-700 (для реализации основных и вторичных реперных точек в диапазоне от 50 до 700 °С) и
- ПРТ600-1100 (для реализации основных и вторичных реперных точек в диапазоне от 700 до 1100 °С).

Результаты исследований этих печей в рамках НИР «Кельвин» показали исключительно высокие их метрологические и эксплуатационные характеристики (Таблица 1).

В диапазоне выше температуры затвердевания серебра (1235 К) для определения термодинамической температуры предполагается использовать методы радиационной термометрии.

Данные методы изложены в документе *Mise en Pratique*, разрабатываемом Консультативным комитетом по термометрии, содержащем рекомендации по практической реализации как Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-(90)), так и основных методов первичной термометрии, рекомендуемых для использования после введения нового определения кельвина.

Таблица 1 – Метрологические и эксплуатационные характеристики печей ПРТ 50-700 и ПРТ 700-1100.

№ п/п	Наименование прибора	Страна, фирма-производитель	Метрологические и эксплуатационные характеристики
1	ПРТ 50-700	Россия, ОАО НПП «Эталон» (г. Омск).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диапазон температуры, °С: от 50 до 680;</li> <li>2. Нестабильность поддержания температуры <math>\pm 0,02</math> К;</li> <li>3. Перепад температуры между дном термометрического канала и на высоте 15 см от дна <math>\pm 0,01</math> К</li> <li>4. Разрешающая способность дисплея 0,01 К;</li> <li>5. Наибольшая потребляемая мощность 3500 Вт;</li> <li>6. Диаметр жаровой трубы 62 мм</li> </ol>
2	ПРТ 700-1100	Россия, ОАО НПП «Эталон» (г. Омск).	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Диапазон температуры, °С: от 700 до 1100;</li> <li>2. Нестабильность поддержания температуры <math>\pm 0,04</math> К;</li> <li>3. Перепад температуры между дном термометрического канала и на высоте 15 см от дна <math>\pm 0,2</math> К</li> <li>4. Разрешающая способность дисплея 0,01 К;</li> <li>5. Наибольшая потребляемая мощность 3500 Вт;</li> <li>6. Диаметр жаровой трубы, 52 мм</li> </ol>

В документе «*Mise en Pratique*» изложены два метода измерения термодинамической температуры, которые могут быть использованы для

воспроизведения единицы температуры в диапазоне выше температуры затвердевания серебра (1235 K) в соответствии с ее новым определением [5-8]:

- прямой метод измерения с использованием абсолютного радиометра;
- относительная первичная термометрия, основанная на использовании высокотемпературных реперных точек.

В основе прямого метода лежит измерение спектральной мощности излучения абсолютно черного тела, прослеживаемое к единицам из СИ.

Спектральная плотность яркости,  $L_{b,\lambda}$ , представляющая собой мощность теплового потока, излучаемую черным телом в единицу телесного угла в интервале длины волны  $d\lambda$ , описывается законом Планка (1):

$$L_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \left( \frac{2hc^2}{n^2 \lambda^5} \right) \cdot \frac{d\lambda}{\exp\left(\frac{hc}{n\lambda kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

где:

$k$  – постоянная Больцмана;

$h$  – постоянная Планка;

$c$  – скорость света;

$n$  - показатель преломления газа в оптической оси;

$\lambda$  - длина волны в газе;

$\varepsilon(\lambda, T)$  – излучательная способность (коэффициент черноты);

$T$  – термодинамическая температура.

При использовании прямого метода воспроизведение и передача единицы температуры по тепловому излучению осуществляется в четыре этапа:

- измерение мощности стабилизированного лазера абсолютным криогенным калориметром;
- калибровка специального приемника излучения (трап-детектора) лазером по мощности;
- калибровка специального приемника излучения (трап-детектора) лазером по мощности;
- калибровка специального приемника излучения (трап-детектора) лазером по мощности.

Применение первичной радиометрии требует, чтобы используемые величины имели прослеживаемость к единицам системы SI. Таким образом, измерение мощности должно иметь прослеживаемость к ватту и метру (длина волны, расстояние и площадь).

Воспроизведение единицы температуры методом относительной первичной термометрии основано на использовании высокотемпературных

реперных точек. В качестве высокотемпературных реперных точек используются температуры фазовых переходов (плавления, затвердевания) эвтектических сплавов металл-углерод [9, 10, 11, 12], а также эвтектических и перитектических сплавов (карбид металла) – углерод (МС-С). Реперным точкам, используемым для реализации метода относительной первичной термометрии, должны быть уже присвоены значения термодинамической температуры и неопределенность, имеющая место при реализации косвенных методов.

Термодинамическая температура фазовых переходов эвтектик определяется прямым методом.

Предполагается, что неопределенность воспроизведения кельвина методом относительной первичной термометрии близка (или немного выше), чем неопределенность прямого метода, но он значительно легче реализуем практически.

Возможны три варианта реализации метода относительной первичной термометрии:

- экстраполяция, основанная на одной реперной точке;
- интерполяция между двумя или тремя реперными точками;
- подбор методом наименьших квадратов, если используются больше трех реперных точек.

Функция преобразования радиационного термометра, градуированного в реперных точках, может быть описана соотношением (2), которое является планковской формой уравнения Sakuma–Hattori [13, 14]:

$$S T = \frac{C}{\exp\left(\frac{c'_2}{AT + B}\right) - 1}, \quad (2)$$

где:  $c'_2 = c_2/n = hc/kn$ ;  $A, B, C$  – коэффициенты.

Коэффициенты  $A, B$  и  $C$  связаны со спектральной чувствительностью радиометра,  $s(\lambda)$ . Измеренные пары  $(T, S)$  формируют ряды данных для экстраполяции, интерполяции и метода наименьших квадратов.

В настоящее время рассматривается возможность и целесообразность использования следующих высокотемпературных реперных точек (Таблица 2) [15].

Эта таблица периодически будет пересматриваться по мере появления новых результатов измерений термодинамической температуры и исследований ВТРТ на основе других сплавов и металлов.

Таблица 2 – Высокотемпературные фиксированные точки на основе эвтектик металл - углерод

Состав эвтектики	Значение температуры фазового перехода, К	Стандартная неопределенность, К	Расширенная (k=2) неопределенность, К
Re-C	2747.84	0.177	0.35
Pt-C	2011.43	0.089	0.18
Co-C	1597.39	0.063	0.13
Cu	1357.802	0.0405	0.081

В рамках НИР «Кельвин был создан экспериментальный образец нового первичного эталона единицы температуры, который обеспечил возможность воспроизведения кельвина методом относительной первичной термометрии (рисунок 3).

Следующим шагом на пути совершенствования эталона является реализация прямого метода воспроизведения единицы температуры в соответствии с ее новым определением. Эта работа уже ведется во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». На рисунке 4 показана структурная схема экспериментального образца эталона, обеспечивающего возможность воспроизведения кельвина прямым методом, а также методом относительной первичной термометрии.

## Литература

- 1 Походун А. И., Дедиков Ю. А. и др. “Разработка концепции развития системы метрологического обеспечения температурных измерений”, Отчет по НИР инв. № 02200900744, 2008.
- 2 The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), BIPM, Sèvres, 1990
- 3 Recommendation 2 (CI-2005) of the CIPM, Sevres, BIPM (2005).
- 4 J. Fischer, S. Gerasimov, K. D. Hill, G. Machin, M. R. Moldover, L. Pitre, P. Steur, M. Stock, O. Tamura, H. Ugur, D. R. White, I. Yang, J. Zhang. Preparative Steps Towards the New Definition of the Kelvin in Terms of the Boltzmann Constant. Springer Science+Business Media, LLC 2007.
- 5 Machin G., Bloembergen P., Anhalt K., Hartmann J., Sadli M., Saunders P., Woolliams, E., Yamada, Y., Yoon H., “Practical implementation of the mise-en pratique for the definition of the kelvin above the silver point”, Tempmeko 10.
- 6 Hartmann J., Anhalt K., Taubert D.R., Hollandt J. “Absolute radiometry for the MeP: the irradiance measurement method”, Tempmeko 10.

- 7 Woolliams E., Dury M., Burnitt T., Alexander P.E.R., Winkler R., Hartree W., Salim S., Machin G., “Primary radiometry for the mise-en-pratique for the definition of the kelvin: the hybrid method”, Tempmeko 10.
- 8 Yoon H.W., Gibson C.E., Eppeldauer G.P., Smith A.W., Brown S.W., Lykke K.R., “Thermodynamic radiation thermometry using radiometers calibrated for radiance responsivity”, Tempmeko 10.
- 9 Y. Yamada, H. Sakate, F. Sakuma and A. Ono // Metrologia. – 1999. – 36. – P. 207-209.
- 10 Y. Yamada, F. Sakuma and A. Ono // Metrologia. – 2000. – 37. – P. 71-73.
- 11 Y. Yamada, H. Sakate, F. Sakuma and A. Ono // Metrologia. – 2001. – 38. – P. 213-219.
- 12 N. Sasajima, Y. Yamada, and F. Sakuma // AIP Proceedings. – 2003. – 684 P.
- 13 Sakuma, F., Kobayashi, M., “Interpolation equations of scales of radiation thermometers”, in Proceedings of TEMPMEKO '96, Sixth International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, edited by P Marcarino, Levrotto & Bella, Torino, 305–310, 1997.
- 14 Saunders P., “Uncertainties in the realisation of thermodynamic temperature above the silver point”, Tempmeko ‘10.
- 15 Sadli, M., Fischer, J., Yamada, Y., Sapritsky, V., Lowe, D., Machin, G., “Review of metal-carbon eutectic temperatures proposal for new ITS-90 secondary points”, In: Tempmeko 04, The 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Zagreb, Croatia, Editor in Chief Davor Zvizdic, Published: LPM/FSB, 341-348, 2005.

## Секция № 06 «Измерения ионизирующих излучений»

Содержание	стр.
И.А. Харитонов, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» «К столетию отдела измерений ионизирующих излучений ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»	158
И.О. Васильев, В.А. Стяжкин, ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России» «Метод уменьшения составляющей погрешности измерений активности радионуклидов, обусловленной неравномерностью активного слоя источников и чувствительности детектора»	178
Р.А. Абдулов, М.Н. Гурский, А.А. Громов, И.А. Емельяненко, А.П. Жанжора, В.П. Тенишев, ФГУП «ВНИИФТРИ» «Разработка пленочного химического дозиметра для измерения поглощенных доз высокоинтенсивного ионизирующего излучения в диапазоне от 5 до 60 кГр»	183
А.Б. Рогозов, Ю.А. Тычинкин, Э.А. Титов, ЗАО «РИТВЕРЦ» «Эталоны для измерений ионизирующего излучения»	185
А.В. Берлянд, ФГУП «ВНИИФТРИ» «Применение государственного первичного эталона поглощенной дозы фотонного и электронного излучений для дозиметрии терапевтических пучков протонного излучения»	188
Р.В. Лукашевич, НПП «АТОМТЕХ» «Калибровка сцинтилляционного блока-компаратора в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы»	194
В.Ю. Сухов, Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, В.А. Поспелов, ГБУЗ «Городская клиническая больница № 31» «Форсайт будущих потребностей в медицинских изотопах»	209
И.Г. Тарутин, РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова «Метрологические проблемы дозиметрии в радиационной медицине»	213
В.В. Генералова, А.А. Громов, М.Н. Гурский, А.П. Жанжора, И.А. Емельяненко, В.П. Тенишев, ФГУП «ВНИИФТРИ» «Метрологическое сопровождение радиационных технологий»	222
П.Ф. Масляев, С.Г. Федоров ФГУП «ВНИИФТРИ» «Использование сцинтиллятора на основе литиевого стекла для регистрации нейтронного излучения»	224

## К СТОЛЕТИЮ ОТДЕЛА ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ ВНИИМ им. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Харитонов И.А.

*ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева»*

[khia@vniim.ru](mailto:khia@vniim.ru)

### **Введение**

1 марта 1896 г. французский физик, известный специалист в области флуоресценции минералов, Анри Антуан Беккерель, проводя исследования уранила калия в своей лаборатории, которая находилась во флигеле Ботанического сада (Jardin de Plantes) в Париже, обнаружил неизвестное собственное излучение урановой соли, не связанное с ее облучением солнечным светом. Так было открыто явление радиоактивности.

В 1898 г. Пьер и Мария Кюри, изучая радиоактивность урановой руды из Иохимсталя (Чехия), пришли к заключению о присутствии в ней какого-то элемента, обладающего очень сильной радиоактивностью, во много раз превышающей радиоактивность урана. В июле 1898 г. они сообщили об открытии нового радиоэлемента, названного ими полонием (в честь родины М. Склодовской-Кюри), а в декабре того же года – об открытии радия (вместе с Ж.Бемоном).

Д.И. Менделеев проявил живейший интерес к работам А. Беккереля и супругов Кюри в области радиоактивности, поскольку он предполагал наличие некоторых особенностей у элементов конца таблицы элементов, открытой им, и обнаружение двух новых элементов – радия и полония и изучение их свойств казалось ему очень важным [1].

В апреле 1902 г. Д.И.Менделеев приехал в Париж в связи с опытами по измерению величины силы тяжести в Международном Бюро Мер и Весов (МБМВ). Во время этой поездки он присутствовал на заседании Парижской академии наук, встречался с французскими учеными, а 29 апреля, вместе с супругами Кюри, посетил лабораторию А. Беккереля, где наблюдал явление радиоактивности и сделал об этом следующую запись в путевом дневнике:

“16/29 апреля. Вторник. В 3 ч у Беккереля (Jardin de Plantes) с  $M^r$  et  $M^{me}$  Curie. Все, что можно, радиоактивное видел. Radium=223. Очень характерно, важно, но не ясно. Отчего содействует разряду? ZnS светит от раствора. Заряжение проходит”

По возвращении из командировки Д.И. Менделеев предпринял попытку провести исследования радиоактивных свойств радия в Главной

Палате Мер и Весов. После приобретения в Германии препарата бромистого радия, Д.И. Менделеев поручил своему лаборанту М.В. Иванову исследовать способность излучения радия разряжать заряженный электроскоп с целью выяснения влияния внешних условий на разрядную способность радия.

В отчете, представленном Д.И. Менделееву, М.В. Иванов писал:

“Разрядная радиоактивность радия измерялась в следующих условиях:

- 1) радий находился в трубке под обыкновенным давлением;
- 2) радий находился в пустоте,
- 3) радий находился в пустоте и нагревался до 100 °С,
- 4) радий нагревался под обыкновенным давлением до 100 °С без высушивания,
- 5) радий подвергался сильному выслушиванию и нагреванию до 100 °С. Давление в трубке с радием после выкачивания не превосходило 0,0001 мм”.

Так начались исследования в области радиоактивности и ионизирующих излучений в Главной Палате Мер и Весов (ВНИИМ им. Д.И.Менделеева), которые продолжают уже более 100 лет [2].

После смерти Д.И.Менделеева исследования в области радиоактивности в Главной Палате Мер и Весов были временно прекращены, однако они интенсивно проводились в других научных учреждениях России, прежде всего с целью решения задачи получения радия путем промышленной переработки отечественных урановых руд. В связи с важностью этой проблемы Министерство народного просвещения, курировавшее в тот момент это направление, в январе 1914 г. провело особое совещание, в решении которого была отмечена необходимость организации при Главной Палате Мер и Весов «специальной лаборатории для проверки качества радиевых препаратов и установления эталона для их оценки». Это решение предопределило развитие метрологических исследований в области ионизирующих излучений в Главной Палате Мер и Весов и привело к организации сначала радиологической лаборатории (1918 г.), а впоследствии-отдела измерений ионизирующих излучений (1940 г.).

В период 1914–1921 гг. в Главной Палате Мер и Весов были проведены работы по исследованию урановых руд и изготовлению источников на основе радия, которые выполнили известные радиохимики В.С. Бородавский и Л.С. Коловрат-Червинский [3], последний, в 1918 г., и возглавил созданную во ВНИИМ радиологическую лабораторию.

В истории отдела ионизирующих излучений ВНИИМ им. Д.И. Менделеева можно условно выделить три периода довоенный - 1918–1940;

послевоенный - 1944–1990;  
современный - 1990–2017.

### **Довоенный период 1918–1940 гг.**

Первые систематические исследования в области измерений ионизирующих излучений в лаборатории начались в 1921 г., после того как ее возглавил Л.Н. Богоявленский. Необходимость проведения этих исследований была обусловлена их востребованностью при выполнении измерений, осуществляемых:

- в процессе поисковых работ месторождений урана и производства радия;
- в рамках проведения медицинских процедур в рентгенографии.

В соответствии с этим в лаборатории сложились следующие основные направления деятельности, связанные с разработкой точных измерений

- активности радия в источниках с целью создания эталона единицы активности (массы) радия;
- экспозиционной дозы рентгеновского излучения с целью создания эталона единицы рентгена.

Важность создания эталона радия была осознана мировым сообществом ученых практически с момента открытия явления радиоактивности, поскольку существовала необходимость в сопоставлении результатов измерений в области радиоактивности, выполненных в лабораториях различных стран, между собою. Было необходимо выбрать измеряемые физические величины, установить единицы этих величин и создать эталоны этих единиц. Прежде всего, было решено изготовить эталонный радиевый препарат, содержащий точно известное количество (массу) этого радиоэлемента, изготовить из него определенное количество источников с известной массой радия и распределить эти источники в качестве эталонов среди национальных лабораторий.

Международный Комитет по электричеству и радиологии, собравшийся в 1910 г. в Брюсселе, поручил работу по изготовлению таких эталонов Марии Склодовской-Кюри, которую она выполнила в 1911 г. Радий для препарата был выделен из иохимстальской урановой руды и перед тем использовался М. Склодовской-Кюри для определения атомной массы радия. Одновременно с М. Склодовской-Кюри подобную работу по изготовлению эталонов радия выполнил О. Хенигшмид в Венском институте радия.

Следующая сессия Международного Комитета в 1912 г. утвердила препарат радия, изготовленный М. Кюри, в качестве первичного международного эталона, а препарат, изготовленный О. Хенигшмидом, в качестве основной копии международного эталона. Было решено также, что в дальнейшем масса радия во всех других радиевых источниках

должна определяться сравнением их по ионизационному действию гамма-излучения с эталонными источниками и выражаться в миллиграмм-эквивалентах радия.

Была образована Международная Комиссия по радиевым эталонам, в состав которой вошли: Э. Резерфорд (председатель), М. Кюри, Ст. Мейер, А. Дебьерн, Ф. Содди, О. Ган и Э. Швейдлер. Эта Комиссия распределяла между различными странами радиевые источники, изготовленные по ее заказу, сравненные с парижским и венским международными эталонами и аттестованные, таким образом, в ранге вторичных международных эталонов, и выдавала сертификаты на эти эталоны. Такие вторичные международные эталоны получили: Франция, Германия и Англия в 1912 г, США, Швеция, Япония и Португалия в 1913 г., Дания в 1915 г., Бельгия в 1924 г. (три эталона), Чехословакия в 1924 г. (два эталона), Венгрия в 1925 г., СССР в 1927 г. (два эталона №№ X и XI), Австралия в 1928 г. и Канада в 1932 г.

В Главную Палату Мер и Весов были доставлены из Франции два вторичных международных эталона единицы массы радия №№ X и XI с сертификатами Международного комитета по радиевым эталонам, подписанными Э. Резерфордом, М. Кюри и Ст. Мейером, в которых удостоверялось, что эталоны X и XI сличены с первичным международным эталоном в Париже и с эталоном-копией в Вене.

В связи с получением эталонов X и XI, предназначенных для использования в качестве государственного эталона СССР, при Главной Палате Мер и Весов был образован Комитет по радиевым эталонам в составе Президента Главной Палаты академика Д.П. Коновалова (председатель), академиков В.И. Вернадского и А.Ф. Иоффе. На первом заседании 5 июня 1928 г. Комитет принял решение считать оба эталона – X и XI основным эталоном Советского Союза [4].

В начале 30-х годов возникли опасения за сохранность международных радиевых эталонов 1911 г., и по просьбе Международной комиссии по радиевым эталонам О. Хенигшмид приготовил 20 новых эталонов. Один из эталонов (№ 5430) был выбран в качестве нового первичного международного радиевого эталона, подлежащего хранению в Париже. Эталон № 5428 был передан Институту радия в Вене для замены старого эталона-копии 1911 г. Остальные эталоны были распределены между различными странами для замены прежних национальных эталонов или оставлены в резерве для этой же цели. В 1956 г. Советский Союз получил образец радия № 5427, изготовленный О. Хенигшмидом в 1934 г. Этот образец вместе с 19 другими подобными образцами образует нормализованную систему радиевых эталонов – международный первичный эталон массы радия.

В рамках работ по созданию эталона радия в Главной Палате Мер и Весов была использована установка для сличения радиевых источников на основе “плоского гамма-конденсатора Кюри” и пьезо-кварцевого компенсатора заряда, которая была куплена во Франции и усовершенствована за счет использования метода Таунсенда и ионизационной камеры.

В настоящее время образец радия № 5427 хранится во ВНИИМ и в совокупности со средствами хранения и передачи единицы массы радия образует комплекс средств измерений, входящих в состав ГПЭ единицы массы радия ГЭТ 7-2011. В период 2009-2011 гг. в рамках работ по совершенствованию эталона были введены в его состав современные средства измерений для передачи единицы массы радия и создана система, обеспечивающая сохранность и безопасность эксплуатации образца радия № 5427 [5].

Так была выполнена задача по созданию «специальной лаборатории для проверки качества радиевых препаратов и установления эталона для их оценки», поставленная перед Главной Палатой Мер и Весов еще в 1914 г.

В период 1920–1930 гг. учреждения здравоохранения СССР начинают комплектоваться диагностическими рентгеновскими аппаратами, в связи с чем возникает необходимость метрологического обеспечения дозиметрических измерений в целях определения и учета дозовой нагрузки рентгеновского излучения, как для пациентов, так и для персонала. Научные работы, выполненные советскими учеными П.И. Лукирским, Д.Н. Наследовым, В.М. Дукельским и др., позволили сформулировать определение единицы экспозиционной дозы рентгеновского излучения, и условия ее воспроизведения. Единица экспозиционной дозы – Рентген в этом определении была утверждена как основная единица экспозиционной дозы на II Международном Конгрессе рентгенологов.

В 1925 году во ВНИИМ была организована рентгенометрическая лаборатория, руководителем которой был назначен И.В. Поройков. Под его руководством были выполнены работы в области рентгенометрии, которые завершились созданием в 1931 году национального эталона (четырёхкамерный вариант) единицы экспозиционной дозы – рентгена [6].

В 1940 г. во ВНИИМ был организован отдел измерений ионизирующих излучений в составе радиологической и рентгенометрической лабораторий, руководителем которой был назначен К.К. Аглинцев.

Так завершился первый, довоенный, этап метрологических исследований в области ионизирующих излучений во ВНИИМ:

- от момента открытия радия, исследования его свойств, разработки технологии его выделения из отечественной руды до создания

«специальной лаборатории для проверки качества радиевых препаратов и установления эталона для их оценки»;

- от определения единицы экспозиционной дозы рентгеновского излучения до создания эталона Рентгена, создания рентгенометрической лаборатории и начала дозиметрических исследований во ВНИИМ.

Во время Великой Отечественной войны исследовательские работы в отделе были прекращены, большая часть сотрудников была эвакуирована, а оставшиеся сотрудники во время блокады выполняли задания для фронта.

### **Послевоенный период 1944-1990 гг.**

После окончания войны часть сотрудников вернулась во ВНИИМ, были приняты на работу новые сотрудники, и в 1947 г. был вновь создан отдел измерений ионизирующих излучений в составе радиологической (радиометрической), рентгенометрической (дозиметрической), нейтронной и лаборатории ядерной спектроскопии (1956 г.). В этот послевоенный период в отделе работали выдающиеся ученые: П.И. Лукирский, К.К.Аглинцев, А.С. Карамян, Б.С. Джелепов, А.А. Константинов, Ф.М. Караваев, М.Ф. Юдин и др.

Сразу после окончания войны перед отделом были поставлены следующие основные задачи по обеспечению единства измерений радиоактивности и ионизирующих излучений:

- в полевых условиях с помощью многочисленного парка радиометров при определении загрязненности поверхностей и территорий альфа и бета-нуклидами после проведения испытаний оружия, в санитарной зоне предприятий, при захоронении радиоактивных отходов и т.д.;
- в технологических процессах, связанных с производством радионуклидной продукции, в первую очередь – радионуклидных источников;
- в здравоохранении и охране труда с целью обеспечения учета доз при диагностических процедурах и производственных операциях.

В соответствии с этим в отделе были развернуты следующие основные направления работ [7]

- разработка и создание точных методов и средств измерений физических величин, которые используются в военной и атомной технике, ядерно-топливном цикле и радиационной защите;
- создание эталонов единиц наиболее востребованных радиометрических, дозиметрических и нейтронных физических величин;
- разработка и создание системы метрологического обеспечения измерений ионизирующих излучений.

В период 1964–1969 гг. во ВНИИМ были проведены следующие исследования по разработке методов и созданию высокоточной аппаратуры для измерений:

- в области активности альфа, -бета,-гамма излучающих радионуклидов с целью воспроизведения единицы активности — Кюри, нового эталона единицы массы радия (К.К. Аглинцев, П.И. Лукирский, М.Ф. Юдин, Ф.М. Караваев, А.А. Константинов, Е.А. Хольнова) [8];
- в области дозиметрии рентгеновского, гамма- и бета-излучений (К.К. Аглинцев, М.Ф. Юдин, З.П. Балон, Г.П. Остромухова, И.А. Уряев, М.П. Кочина, Р.Ф. Кононова, В.Н. Тучин) [9];
- в области точных нейтронных измерений (А.С. Карамян, И.А. Ярицына, М.Ф. Юдин, В.Т. Щеболев, В.И. Фоминых, А.П. Яновский, Г.М. Стуков) [10];
- в области исследования ядерно-физических констант (Б.С. Джелепов, С.А. Шестопалова, О.И. Сумбаев, П.Т. Прокофьев, И.Ф. Учеваткин, В.Э. Тер-Несесянц) [11].

В результате этих исследований были разработаны научные основы воспроизведения важнейших единиц в области измерений ИИ, созданы эталоны и разработаны методы и средства передачи единиц физических величин от эталонов к рабочим приборам и источникам ИИ.

В 1969 г. Госстандарт СССР утвердил систему эталонов единиц [12,13,14] в области измерений ИИ, созданных в отделе ионизирующих излучений ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, в качестве государственных первичных эталонов СССР:

- активности радионуклидов – ГЭТ 6-69, ГОСТ 8.033-74 (К.К. Аглинцев, М.Ф. Юдин, Ф.М. Караваев, А.А. Константинов, Е.А. Хольнова, С.А. Русинова, А.Е. Кочин, В.Я. Алексеев);
- массы радия – ГЭТ 7-69, ГОСТ 8.036-74 (Ф.М. Караваев, Е.А. Хольнова, А.Ф. Дричко, Л.П. Кулькова);
- поглощенной и эквивалентной дозы нейтронного излучения – ГОСТ 8.035-74 (М.Ф. Юдин, А.П. Яновский, СИ. Слепышков, Л.П. Попружко, С.Н. Балахничев, В.И. Фоминых).
- экспозиционной дозы и мощности экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучения – ГЭТ 8-69 и ГОСТ 8.034-74 (И.В. Поройков, К.К. Аглинцев, М.Ф. Юдин, Г.П. Остромухова, З.П. Балон, М.П. Авотина, И.А. Уряев, М.П. Кочина, В.Н. Тучин);
- поглощенной дозы бета-излучения – ГЭТ 9-69, ГОСТ 8.035-74 (К.К. Аглинцев, И.А. Уряев, М.П. Кочина);
- потока нейтронов – ГЭТ 10-69, ГОСТ 8.031-74 (А.С. Карамян, И.А. Ярицына, В.Т. Щеболев, В.И. Фоминых, Г.М. Стуков, Б.И. Кузаев, Ю.С. Силин);

- плотности потока тепловых нейтронов – ГЭТ 11-69, ГОСТ 8.32-75 (И.А. Ярицына, О.Л. Андреев, А.Е. Кочин, Е.П. Кучерявенко, Г.М. Стуков).

В период 1969–1975 гг. были выполнены работы по совершенствованию и оптимизации системы метрологического обеспечения атомной науки и техники, ядерной энергетики, разработки и внедрения новейших радиационных технологий, широкому применению источников ИИ и ускорителей заряженных частиц в медицине для диагностики и лечения заболеваний, разведки полезных ископаемых, ядерной геофизике. Во ВНИИМ вводятся в эксплуатацию новые источники излучений: бетатрон Б50/50 с максимальной энергией 50 МэВ (К.К. Хлебников, М.Ф. Юдин, В.В. Скотников, Н.Д. Виллевалде, И.А. Уряев, Ю.В. Лысанов, Г.В. Абрамов) и источники импульсного рентгеновского излучения.

В результате этих исследований во ВНИИМ были созданы новые эталоны, которые были утверждены в 1975 г. Госстандартом СССР в качестве Государственных эталонов единиц:

- потока энергии тормозного излучения с максимальной энергией 50 МэВ – ГЭТ 72-75, ГОСТ 8.201-76 (М.Ф. Юдин, В.В. Скотников, И.И. Цветков, В.И. Фоминых, В.Н. Бруй, А.Н. Таянович, А.А. Демидов);
- мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения (20-60 кэВ) – ГЭТ 73-75, ГОСТ 8.203-76 (М.Ф. Юдин, В.И. Фоминых, А.П. Себекин, Р.Ф. Кононова, Н.И. Космина);
- потока электронов и потока энергии электронов с энергией 5-50 МэВ – ГЭТ 93-75, ГОСТ 8.202-76 (М.Ф. Юдин, В.И. Фоминых, И.И. Цветков, А.А. Демидов, Г.В. Кисельникова);

В период 1975–1985 гг. возникла потребность в актуализации системы МО ИИ, обусловленная практическими задачами внедрения системы ГСИ, которая была решена путем создания эталонных комплексов, воспроизводящих несколько взаимосвязанных физических величин, созданием сети вторичных эталонов в различных регионах страны, совершенствованием и оптимизацией методов и средств передачи единиц разрядным эталонам (образцовым) и рабочим средствам измерений.

В результате завершения этих работ во ВНИИМ в период с 1979 по 1982 гг. модернизированы и утверждены в новом составе:

- эталонный комплекс единиц экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучения – ГЭТ 8-82, ГОСТ 8.034-82 (Г.П. Остромухова, М.П. Кочина, В.И. Фоминых, Р.Ф. Кононова, Е.Н. Юрятин, А.П.

Себекин, Ю.В. Лысанов, Т.Н. Новоселова, С.А. Федина, Г.И. Маньков):

- эталон единицы поглощенной дозы бета-излучения – ГЭТ 9-82, ГОСТ 8.035-82 (И.А. Уряев, Е.Н. Румянцева, А.М. Выгодский, Ю.В. Лысанов, В.И. Фоминых);
- эталонный комплекс единиц потока и плотности потока нейтронов – ГЭТ 10-81, ГОСТ 8.031-82 (В.Т. Щеболев, З.А. Рамендик, Г.М. Стуков, И.А. Харитонов, Е.П. Кучерявенко, Ш.В. Яблоков, В.А. Тумольский);
- эталонный комплекс единиц активности радионуклидов, удельной объемной и поверхностной активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа- и бета-частиц и фотонов, – ГЭТ 6-84, ГОСТ 8.033-84 (М.Ф.Юдин, Ф.М. Караваяев, А.А. Константинов, Е.А. Хольнова, А.Е. Кочин, В.Я. Алексеев, А.Ф. Дричко);
- эталон экспозиционной дозы, средней мощности экспозиционной дозы, среднего потока и средней плотности потока энергии импульсного рентгеновского излучения – ГЭТ 134-82, ГОСТ 8.473-82 (М.Ф. Юдин, Н.Д. Виллевалде, И.А. Уряев, А.В. Оборин, Ю.А. Волков, В.И. Фоминых).

В рамках работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС, случившейся в 1986 г., были разработаны методы и аппаратура, обеспечивающие массовый радиационный контроль объектов окружающей среды, продукции сельского хозяйства, животноводства, сырья, пищевых продуктов, загрязненных радионуклидами. Эти исследования привели к совершенствованию действующего эталона единицы активности радионуклидов ГЭТ 6-84 и созданию в его составе новых эталонных установок. В 1995 г. Госстандартом РФ был утвержден [15] в новом составе Государственный первичный эталон единиц активности, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников ГЭТ 6-95 (ГОСТ 8.033-96), представленный коллективом авторов ВНИИМ в составе: Ю.В. Тарбеев, М.Ф. Юдин, Н.И. Кармалицын, И.А. Харитонов, Т.Е. Сазонова, А.Е. Кочин, Е.А. Хольнова. За эту работу авторский коллектив ВНИИМ был удостоен премии Правительства РФ за 1996 г.

Всего в 1990 г. в СССР в области ионизирующих излучений эксплуатировалось 14 первичных эталонов: 8 – во ВНИИМ и 6 во ВНИИФТРИ.

Таким образом, второй этап развития отдела измерений ионизирующих излучений ВНИИМ завершился созданием системы национальных эталонов единиц основных физических величин в области радиометрии, дозиметрии и нейтронных измерений и системы метрологического обеспечения измерений в стране, опирающейся на

средства измерений: первичные, вторичные, разрядные эталоны, приборы и меры и научно-техническую документацию: поверочные схемы, методики поверки, протоколы измерений и свидетельства о поверке.

### **Современный период 1990–2017 гг.**

Современный этап истории отдела, который включает период с 1990 г. по настоящее время, в свою очередь, целесообразно рассматривать как два отдельных периода, один из которых пришелся на время преобразований в стране, происходивших в 1990–2000 гг.

В связи с изменениями, произошедшими в это время в стране, объем государственного финансирования промышленности резко сократился, что заставило предприятия отказаться от непрофильных расходов, в частности, от работ, относящихся к метрологии.

Поскольку финансирование ВНИИМ целиком зависело от бюджетных поступлений, направляемых во ВНИИМ непосредственно Госстандартом на поддержку эталонов и их совершенствование или опосредованно через предприятия - заказчиков метрологических услуг, объем финансовых поступлений ВНИИМ резко сократился. В связи с этим, в 1993 г. отдел был преобразован вынужденно сначала в две лаборатории: государственных эталонов в области измерений активности (рук. лаб. И.А. Харитонов) и дозиметрии ионизирующих излучений (рук. лаб. В.И. Фоминых), а затем в 1995 г. – в одну лабораторию государственных эталонов в области измерений ионизирующих излучений (рук. лаб. И.А. Харитонов) с общей численностью сотрудников 23 человека.

Период 1990–2000 гг. можно охарактеризовать как период выживания, как для предприятий - заказчиков метрологических услуг, так и для отдела ионизирующих излучений ВНИИМ. В этот период на рынке приборостроения и метрологических услуг произошли следующие важные изменения

- появились иностранные производители измерительной техники, которые в течение 10 лет фактически вытеснили отечественного производителя с рынка консолидированных интеллектуальных приборов;
- акционировались бывшие государственные приборостроительные заводы;
- появились российские частные предприятия в сфере приборостроения и метрологических услуг;
- увеличился объем испытаний с целью утверждения типа средств измерений, сертификации продукции и аттестации программного обеспечения метрологического назначения за счет интеграции российского рынка товаров и услуг в международный рынок;
- возникла сеть испытательных лабораторий радиационного контроля, которая нуждалась в аккредитации для выполнения

работ по аттестации продукции и услуг по радиационному признаку.

С учетом этих изменений рынок метрологических услуг стал развиваться в новом формате [16], что привело к необходимости внесения соответствующих изменений, как в структуру тематических направлений, так и в организационную структуру отдела. В 2006 г. лаборатория государственных эталонов в области измерений ионизирующих излучений была вновь преобразована в отдел (рук. отдела И.А. Харитонов – с 2006, Н.Н. Моисеев – с 2009 г., С.Г. Трофимчук – с 2011 г.). В отделе были организованы два новых сектора: сектор испытаний СИ с целью утверждения типа (рук. сектора Н.Д. Виллевалде) и сектор аккредитации лабораторий радиационного контроля (рук. сектора С.Г. Трофимчук).

Исследовательские работы по традиционным направлениям: дозиметрия бета, гамма и рентгеновского излучения, измерение активности радионуклидов и нейтронные измерения из-за недостаточного финансирования в период 1990–2000 гг. практически не велись, а оборудование из состава первичных эталонов в основном использовалось для поверки рабочих эталонов и средств измерений.

Начиная с 2000 г., Росстандарт частично восстановил объем финансирования работ по содержанию и развитию первичных эталонов, что позволило начать работы по модернизации и совершенствованию эталонов, планировать работы по их развитию и вернуться к традиционной структуре отдела. Структура отдела, которая утверждена в 2016 г., включает 4 лаборатории (кроме указанных выше тематических лабораторий, в составе отдела в настоящее время имеется лаборатория прикладных исследований), и соответствует уровню востребованности измерений ионизирующих излучений со стороны экономики и общества в России.

На современном этапе развития метрологии приоритеты в востребованности точных измерений в обществе существенно изменились, и главными направлениями, определяющими развитие измерений ионизирующих излучений, стали здравоохранение и радиоэкология. Важным направлением стало также уточнение метрологических характеристик эталонов по результатам ключевых сличений с целью обеспечения соответствия их метрологических характеристик условиям, предъявляемым к национальным эталонам, участвующим в ключевых сличениях.

В обеспечение развития новых направлений во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в период 2000–2016 гг. были выполнены работы по модернизации и совершенствованию действующих эталонов [17], в результате которых были утверждены в новом составе оборудования государственные первичные эталоны единиц

- потока электронов, плотности потока электронов и флюенса (переноса) электронов, потока энергии, плотности потока энергии и флюенса (переноса) энергии электронного и тормозного излучения – ГЭТ 93-2001, ГОСТ 8.576-01 (А.В. Оборин, И.И. Цветков,) [18];
- кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучения – ГЭТ 8-2011, ГОСТ 8.034-11 (А.В. Оборин, А.Ю. Виллевальде, Н.Д. Виллевальде) [19];
- массы радия – ГЭТ 7-2011, ГОСТ 8.036-11 (Н.Н. Моисеев, Е.Е. Терещенко) [5];
- активности, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников – ГЭТ 6-2016 (С.Г. Трофимчук, И.В. Алексеев, И.А. Харитонов, Н.Н. Моисеев, Г.В. Жуков, Т.И. Шильникова, А.В. Заневский, Е.Е. Терещенко, Д.М. Эфрос) [20].

Одним из основных направлений деятельности отдела, наряду с созданием и совершенствованием первичных эталонов, является метрологическое обеспечение измерений ионизирующих излучений в стране, потребность в котором зависит от изменений, происходящих в экономике страны [21].

Основным направлением метрологического обеспечения измерений в стране до 1986 г. было обеспечение правильности измерений метрологических характеристик радиометров, выпускаемых предприятиями в качестве продукции, и серийных унифицированных источников излучения, применяемых для поверки и калибровки радиометров активности, потока и плотности потока частиц и нейтронов и дозиметров ионизирующего излучения [22].

После катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 г. на первое место выдвинулась задача метрологического обеспечения измерений, выполняемых при радиоэкологическом мониторинге окружающей среды. Возросла роль специальных эталонных источников для имитации реальных объектов измерений – образцов почв, пищевых продуктов, фантомов человека, загрязненных радионуклидами, создаваемых на основе эталонных (образцовых) растворов радионуклидов.

В период 2000–2017 гг. наиболее важными направлениями с точки зрения востребованности измерений стали радионуклидная диагностика, лучевая терапия и охрана окружающей среды, метрологическое обеспечение которых является в настоящее время актуальной проблемой. Развитие ядерной медицины в России, методы которой сегодня все шире применяются при диагностике самых различных заболеваний: кардиологических, неврологических, эндокринологических,

онкологических и др. предусматривает создание в стране высокотехнологичных центров медицинской радиологии с целью организации массовых скрининговых осмотров населения [23,24].

Отдел осуществляет метрологическое обеспечение измерений ионизирующих излучений в рамках двух направлений

- путем практической реализации поверочных схем [25];
- путем непосредственного взаимодействия с отраслевыми лабораториями и предприятиями по актуальным метрологическим направлениям развития производства и технологий.

В качестве примеров взаимодействия по значимым направлениям можно привести следующие работы:

- метрологическое сопровождение производства и первичной поверки источников из кобальта-60 в ПО МАЯК (Челябинск) для экспортных поставок радионуклидной продукции в Великобританию, технологии производства оружейного плутония во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, источников медицинского назначения, в том числе протяженных источников из кобальта-60 и калифорния-252, иридия-192 и др. совместно с ГНЦ НИИАР (Дмитровград), кюрия-244, америция-243, полония-210 в растворах совместно с РИ им. В.Г. Хлопина и РФЯЦ-ВНИИЭФ (Саров) – для обеспечения поставок радионуклидной продукции в Японию и Швейцарию;

- разработка и аттестация рабочих эталонов в виде источников специального назначения-имитаторов технологических сред и проб окружающей среды, совместно с РИ им. В.Г. Хлопина и НТЦ РИМЭКС, – для комбинатов Минатома; в виде фантомов человека совместно с НТЦ РАДЭК – для предприятий РОСАТОМЭНЕРГО, имитаторов проб окружающей среды ОМАСН – для СЭС (Санкт-Петербург);

- проведение испытаний СИ и разработка методик поверки измерительных каналов, разработанных НИТИ им. А.А. Александрова – для экспортных поставок систем АСРК в составе АЭС (Китай);

- создание системы метрологического обеспечения измерений активности радионуклидов в фармпрепаратах путем передачи единицы от растворов, использовавшихся в ключевых сличениях, к дозкалибраторам, применяемым в лабораториях медицинских учреждений, и практическая реализация этой системы в лечебных учреждениях Санкт-Петербурга.

Система метрологического обеспечения средств измерений ионизирующих излучений, опирающаяся на эталоны, поддерживаемые в отделе измерений ионизирующих излучений во ВНИИМ, служит основой для развития радиационных технологий, производства радионуклидной продукции, фармпрепаратов, при контроле радиационной безопасности, радиоэкологическом мониторинге, в радиационной диагностике и лучевой терапии в медицине [26-30].

Наряду с обеспечением единства измерений внутри страны важнейшей задачей является поддержание соответствия единиц физических величин на международном уровне. Это достигается неукоснительным соблюдением положений Метрической Конвенции, выполнением решений международных законодательных органов в области метрологии, но главным образом путем участия в международных сличениях эталонов национальных лабораторий.

В соответствии с Договоренностью об эквивалентности национальных эталонов [31], подписанной национальными метрологическими институтами в 1999 г., Консультативные комитеты Международного Комитета Мер и Весов (МКМВ) планируют и проводят ключевые сличения национальных эталонов для установления наилучшего значения единиц СИ на данный момент времени, значений степеней эквивалентности по отношению к наилучшему значению единицы и степеней взаимной эквивалентности. Заключение Договоренности придало международным ключевым сличениям дополнительную важность как инструменту определения международного уровня национальных эталонов [32,33].

Консультативный Комитет МКМВ по эталонам в области измерений ионизирующих излучений (ККИИ), одним из инициаторов создания которого был ВНИИМ, функционирует с 1956 г. В 1969 г. в составе ККИИ были образованы три секции измерений: рентгеновского, гамма и электронного излучений (дозиметрии), активности радионуклидов (радиоактивности) и нейтронного излучения. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, наряду с другими ведущими национальными лабораториями, является постоянным членом секций. На регулярных заседаниях секций рассматриваются, в частности, вопросы планирования, организации и проведения ключевых сличений эталонов единиц в области радиоактивности, дозиметрии и нейтронных измерений, типы которых были выбраны и согласованы на заседаниях секций и утверждены ККИИ.

В области радиоактивности проводятся два типа сличений национальных эталонов единицы активности: многосторонние и в системе SIR. Многосторонние сличения предназначены для определения наилучшего значения единицы Беккереля для данного радионуклида и поэтому в сличениях этого типа, как правило, участвует не менее 20 национальных лабораторий. Сличения в системе SIR проводятся для удовлетворения потребности отдельных лабораторий в подтверждении метрологических характеристик национального эталона по конкретному гамма-излучающему радионуклиду.

Радиометрическая лаборатория ВНИИМ с 1961 г. участвовала более чем в 20 многосторонних сличениях эталонов активности радионуклидов [15,34], в том числе  $^{32}\text{P}$  (1961 г.),  $^{57}\text{Co}$  (1962, 1963, 1972 гг.),  $^{204}\text{Tl}$  (1962 г.),

$^{60}\text{Co}$ (1964 г.),  $^{54}\text{Mn}$  (1972 г.),  $^{139}\text{Ce}$  (1976 г.),  $^{134}\text{Cs}$ (1978 г.),  $^{55}\text{Fe}$  (1978 г.),  $^{125}\text{I}$  (1988 г.),  $^{133}\text{Ba}$ (1984 г.),  $^{139}\text{Ce}$  (1986 г.),  $^{75}\text{Se}$ (1992 г.),  $^{204}\text{Tl}$ (1997 г.),  $^{152}\text{Eu}$ (1999 г.),  $^{89}\text{Sr}$ (2000 г.),  $^{238}\text{Pu}$ (2001 г.),  $^{204}\text{Tl}$ (2002-2003 гг.),  $^{65}\text{Zn}$ (2002 г.),  $^{54}\text{Mn}$ (2003 г.),  $^{51}\text{Cr}$ (2004 г.),  $^{139}\text{Ce}$ (2004 г.),  $^{125}\text{I}$ (2004 г.),  $^{134}\text{Cs}$ (2005 г.),  $^{241}\text{Am}$ (2003, 2006 гг.),  $^{137}\text{Cs}$ (2007 г.),  $^{152}\text{Eu}$ (2008 г.),  $^{99}\text{Tc}$ (2012 г.),  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (2014 г.),  $^{18}\text{F}$ (2014 г.).

Нейтронная лаборатория ВНИИМ, начиная с 1960 г., участвовала в 12 сличениях [35,36], в том числе, потока канадского  $\text{Ra}(\alpha,\text{p})\text{Be}$  источника (1961 г.), плотности потока тепловых нейтронов (1967 г.), плотности потока быстрых моноэнергетических нейтронов с энергией 14,7 МэВ (1982 г.), плотности потока промежуточных нейтронов с энергией 24,5 кэВ (1996 г.), потока нейтронов радионуклидного источника  $\text{Am-Be}(\alpha,\text{n})$  (1999–2003 гг.), плотности потока моноэнергетических нейтронов с энергиями 0.144, 1.2, 5.0 и 14.8 МэВ (2001–2006 гг.), плотности потока моноэнергетических нейтронов с энергиями 0.0274, 0.565, 2.5 и 17 МэВ (2011–2012 гг.), калибровке нейтронных дозиметров в полях радионуклидных источников, рекомендованных стандартом ISO-8529 (2011–2012 гг.),

Дозиметрическая лаборатория ВНИИМ также регулярно участвует [37,38] в ключевых сличениях ККИИ: в 1998–1999 гг. (и в 2009–2011 гг. повторно) лаборатория выполнила ключевые сличения кермы в воздухе на гамма-излучении  $^{137}\text{Cs}$  (VIPM.R(I)-K3) и  $^{60}\text{Co}$  (VIPM.R(I)-K1), а также на рентгеновском излучении при напряжениях на трубке 5-50 кВ (VIPM.R(I)-K2) и 100-250 кВ (VIPM.R(I)-K3).

Наряду с ключевыми сличениями по линии ККИИ проводятся региональные сличения в рамках КООМЕТ, ЕВРАМЕТ и др., а также двусторонние сличения эталонов. В 2005 г. были проведены региональные сличения эталонов единицы активности АРМР с радионуклидом  $^{134}\text{Cs}$ , в 2010 г. – региональные сличения кермы в воздухе ЕВРАМЕТ, в которых со стороны КООМЕТ участвовал ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. В 1998 г. были проведены двусторонние сличения ВНИИМ с LNHВ (Франция) с радионуклидом  $^{226}\text{Ra}$  [39-41], с РТВ (Германия) и LNHВ (Франция) по согласованию единицы поглощенной дозы бета-излучения [42,43].

Высокий уровень эталонов РФ в области ионизирующих излучений, поддерживаемых во ВНИИМ, подтвержденный по результатам более чем 60 международных сличений национальных эталонов, является фундаментом для обеспечения достоверных измерений в стране и признания протоколов измерений, выполненных в России, на международном уровне.

## Заключение

В настоящей работе рассмотрен главным образом метрологический аспект исследований в области радиоактивности с учетом вклада ученых, работавших в Главной Палате Мер и Весов и во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева на протяжении более 100 лет. Даже в этом кратком изложении в истории отдела обнаруживается блестящий круг имен замечательных людей, на протяжении нескольких десятилетий создававших общими усилиями метрологию радиоактивности и ионизирующих излучений в целом, как науку, которая успешно продолжает развиваться и в настоящее время новыми поколениями ученых-метрологов.

## Литература

1. Караваев Ф.М. Измерение активности нуклидов. М: Изд-во стандартов. 1972 .- 228 с.: табл. ил.
2. Харитонов И.А. От открытия радиоактивности до эталона радия// Атомная стратегия. 2003. №2.С. 31-33.
3. Якобсон И.И. В. А. БОРОДОВСКИЙ и Л. С. КОЛОВРАТ-ЧЕРВИНСКИЙ (из истории ранних радиоактивных исследований в России)// Успехи физических наук.1952. май Т.XLVII. вып.1. С. 115-119.
4. Богоявленский Л.Н. Установление основного эталона радия СССР. В сб: Исследование в области радиологии. Труды ВНИИМ. 1939. вып.26(42). С. 3.
5. Моисеев Н.Н. Государственный первичный специальный эталон единицы массы радия//Измерительная техника.№9.М.2013.С.5-7.
6. Поройков И.В. Рентгенометрия.М.-Л..1950. Изд-во технико - теоретической литературы. 1950. 384с.: ил.
7. Аглинцев К.К. Измерения ионизирующих излучений. Научно исследовательские работы в области метрологии // Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965. 280 с.: ил.
8. Караваев Ф.М. Измерения активности радионуклидов. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965.280 с.: ил.
9. Юдин М.Ф. Дозиметрия ионизирующих излучений. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965. 280 с.: ил.
- 10.Ярицина И.А., Нейтронные измерения. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965 г. 280 с.: ил.

11. Шестопалова С.А. Ядерная спектроскопия. Научно исследовательские работы в области метрологии / Ред. Е.Т. Чернышев. - М.; Л.: Изд-во стандартов, 1965 г. 280 с.: ил.
12. Юдин М.Ф., Кармалицын Н.И., Кочин А.Е., Сазонова Т.Е, и др. Комплексный первичный эталон единиц активности радионуклидов, потока и плотности потока ионизирующих частиц радионуклидных источников // Измерительная техника. 1993. № 6. С. 60-62.
13. Андреев О.Л., Ярицына И.А.. Эталон единицы плотности потока тепловых нейтронов// Атомная энергия. 1969. т.26. вып. 3. С.304.
14. Ярицына И.А., Щеболев В.Т., Фоминых В.И., Стуков Г.М. Государственный первичный эталон единицы потока нейтронов// Измерительная техника. 1972, №8. С. 8-11.
15. Кочин А.Е, Харитонов И.А Государственный первичный эталон единиц активности радионуклидов, потока и плотности потока альфа, -бета-частиц и фотонов радионуклидных источников// Метрологическая энциклопедия. изд.2. том 1. СПб. Изд-во Лики России. 2015. С 703-708.
16. Харитонов И.А. Метрология и приборостроение в условиях рыночной интеграции// Атомная стратегия XXI. декабрь 2002. С. 16-17.
17. Трофимчук С.Г., Оборин А.В., Моисеев Н.Н., Харитонов И.А. Комплекс государственных первичных эталонов ВНИИМ им. Д.И.Менделеева в области измерений ионизирующих излучений. //В кн.: Материалы международной научно-технической конференции МЕТРОЛОГИЯ-2014". Минск. БелГИМ. 2014. С. 201.
18. Харитонов И.А., Цветков И.И. "Государственный первичный эталон единиц потока электронов, плотности потока электронов и переноса электронов, потока энергии, плотности потока энергии и переноса энергии электронного и тормозного излучений"// Измерительная техника, №9, М.. 2002.
19. Оборин А.В., Виллевальде А.Ю., Трофимчук С.Г. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений //Измерительная техника. 2012. № 8. С. 3-8.
20. Трофимчук С.Г., Оборин А.В., Моисеев Н.Н., Харитонов И.А. Комплекс государственных первичных эталонов ВНИИМ им. Д.И.Менделеева в области измерений ионизирующих излучений. Международная научно-техническая конференция "МЕТРОЛОГИЯ-2014". Минск. БелГИМ. 2014. Стр. 201.

21. И.А. Харитонов, И.И. Цветков “Государственный первичный эталон единиц потока электронов, плотности потока электронов и переноса электронов, потока энергии, плотности потока энергии и переноса энергии электронного и тормозного излучений”, ИТ, №9, М., 2002 г.
22. Kharitonov I.A., Oborin A.V., Villevalde A.Y. Changes to the VNIIM air kerma primary standard // Metrologia.2007.Vol.44.P.L71-72.
23. Алексеев И.В., Харитонов И.А., Сэпман С.В. Модернизация государственного первичного эталона активности ГЭТ 6-95. В кн.: Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: тез. докл. XIII междунар. совещ. Санкт-Петербург.2015.С.18-19.
24. В.И. Фоминых, И.А. Харитонов, М.Ф. Юдин Метрологическое обеспечение измерений тонизирующих излучений// Метрологическая энциклопедия, 2 изд. Т. 1.СПб.Изд-во:Лики России.2015. С 669-674.
25. И.А. Харитонов Обеспечение достоверности измерений ионизирующих излучений с использованием реально находящихся в обращении средств измерений. В кн.: Международная конференция “Радиационная безопасность: обращение с РАО и ОЯТ”, Санкт-Петербург, 24-27 сентября 2002 г.: доклады 5 международной конференции .С.47-48.
26. Сэпман С.В, Алексеев И.В., Заневский А.В., Терещенко Е.Е., Харитонов И.А. Метрологическое обеспечение измерений активности радионуклидов в радиофармпрепаратах // В кн.: Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: тез. докл. XIII междунар. совещ. Санкт-Петербург.2015.С.82-84.
27. Сэпман С.В., Харитонов И.А., Заневский А.В., Коростин С.В., Божко Н.С. Метрологическое обеспечение измерений активности РФП// В кн.: РАДИОФАРМА. Москва. 17-19 июня 2015.: тез. докл. XIII междунар. научно-практ. конф.С.65.
28. Харитонов И.А. Реализация ФЗ №102” Об обеспечении единства измерений” в период 2008-2015 гг.// В кн.: Проблемы прикладной спектрометрии и радиометрии: тез. докл. XIII междунар. совещ. Санкт-Петербург.2015.С.124.
29. Гришин Д.С., Кучин Н.Л., Кызьюров В.С., Лайкин А.И., Михеев Ю.В., Триумфов Н.Г., Чистяков О.Б., Харитонов И.А. [Погружные гамма-спектрометры – опыт применения и перспективы использования](#) //АНРИ. №2 (85). 2016. С.10–21.
30. Стамат И.П., Терентьев М.В., Харитонов И.А. и др. Международный калибровочный инструмент «ICSE»: некоторые итоги и перспективы обеспечения единства измерений ОА радона

- // В кн.: Практика защиты населения от облучения радоном: матер. науч.-практ. конф. СПб. 1996. С. 18-19.
31. Кочин А.Е., Соколова И.А., Шильникова Т.И., Харитонов И.А., Фоминых В.И.. Метрологическое обеспечение измерений удельной активности трития в воде для целей радиационного контроля окружающей среды// В кн.: "Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов (АТОМТРАНС 2006)": матер. междунар. ядерного форума. СПб, 2006. С.71.
32. Андерсон Е.Б., Гаврилов В.М., Кузнецов Ю.В., Пантелеев Ю.А., Степанов А.В., Тишков В.П., Трофимчук С.Г., Харитонов И.А. Вопросы обеспечения качества в программах радиационного контроля и мониторинга в районах действующих предприятий ЯТЦ, при снятии объектов с эксплуатации и при обращении с РАО// В кн.: Радиационная безопасность: Радиоактивные отходы и экология: матер. II междунар. конфер. СПб, 1999.
33. Виллевалде Н.Д., Оборин А.В., Харитонов И.А. Некоторые аспекты применения государственного первичного эталона экспозиционной дозы (кермы в воздухе) рентгеновского и гамма-излучений в медицинской радиационной дозиметрии// В кн.: Материалы IV международного симпозиума «Актуальные проблемы дозиметрии» 23–24 октября 2003 года. Минск. Изд-во: Триолета. Под общей редакцией к.т.н., доцента В. Чудакова.
34. Харитонов И.А. Соглашение об эквивалентности национальных эталонов – основа метрологического обеспечения международной кооперации в решении радиоэкологических задач// В кн.: Радиационная безопасность: Радиоактивные отходы и экология: матер. II междунар. конфер. СПб, 1999.
35. I.A. Kharitonov Some examples of the MRA application in trading of radionuclide products and radioecological monitoring// Appl.Radiat.Isot. 60. 2004. pp.139-143.
36. Харитонов И.А., Чуновкина А.Г. Международные сличения как инструмент подтверждения измерительных и калибровочных возможностей НМИ и обеспечения единства измерений в международном масштабе// Измерительная техника. 2007. Т.50. №7. С.711-714.
37. I.A. Kharitonov et al Measurement of the activity concentration of the radionuclide Am-241 in a solution// Metrologia 44. Technical Supplement. 2007. 06001.
38. Моисеев Н.Н. Государственный первичный эталон единиц потока и плотности потока нейтронов.// Российская метрологическая

- энциклопедия. 2 изд. Т. 1. СПб. Изд-во: Лики России. 2015. С 689-693.
39. J.Chen, Z. Wang, C. Rong, G. Lövestam, A. Plompen, N. Puglisi, D.M. Gilliam, C.M. Eisenhauer, J.S. Nico, M.S. Dewey, K. Kudo, A. Uritani, H. Harano, N. Takeda, D.J. Thomas, N.J. Roberts, A. Bennett, P. Kolkowski, N.N. Moiseev, I.A. Kharitonov, S. Guldbakke, H. Klein, R. Nolte, D. Schlegel, CIAE, IRMM, NIST, NMIJ, NPL, VNIIM, PTB] International key comparison of neutron fluence measurements in monoenergetic neutron fields: CCRI(III)-K10// Metrologia. 44. Tech. Suppl. 2007. 06005.
40. Оборин А.В. Государственный первичный эталон единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока рентгеновского и гамма излучения// Российская метрологическая энциклопедия. 2 изд. Т. 1. СПб. Изд-во: Лики России. 2015. С. 676-683.
41. C. Kessler, P. J. Allisy-Roberts, A. V. Oborin, A. Y. Villevalde Comparison of the standards for air kerma of the VNIIM and the VIPM for  $^{60}\text{Co}$  gamma radiation // Metrologia. 2011. V. 48, Tech. Suppl., 06001.
42. Morel J., Sepman S., Rasko M., Terechtchenko E., Delgado J.U. Precise determination of photon emission probabilities for the main X- and g-rays of  $^{226}\text{Ra}$  in equilibrium with its daughters// Appl. Rad. Isot. Vol.60. Issue 2-4. 2004. pp. 341-347.
43. N.I. Karmalitsyn, S.V. Sepman, I.A. Kharitonov. Standardization of  $^{226}\text{Ra}$  radionuclide solution// NIM A 369 .1996. pp. 411-413.
44. I.A. Kharitonov, M.A. Rasko, S.V. Sepman, E.E. Terechtchenko, A.M. Hejdelman. A source for measurement of the absolute intensities of  $^{226}\text{Ra}$  gamma-radiation in equilibrium with decay products// Applied Radiation and Isotopes. 56. 2002. pp. 37-40.
45. Helmstädter K., Böhm J., Ambrosi P., Fominych V., Rumyantseva E., Fedina S. Comparison of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate for beta radiation between VNIIM (Russia) and PTB (Germany)// Metrologia. 2004. 41. Tech. Suppl. 06008.
46. Lecante C., Uryaev I., Villevalde N., Rumyantseva E., Chauvenet B. Comparison of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate in beta radiation// Metrologia. 2004. 41. Tech. Suppl. 06009.

# МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТЬЮ АКТИВНОГО СЛОЯ ИСТОЧНИКОВ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЕТЕКТОРА

Стяжкин В.А., Васильев И.О.

*ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России*

Передача единицы активности радионуклидов (АРН) осуществляется методом сравнения рабочих эталонов (РЭ) с однотипными эталонными мерами при помощи компараторов [1, 2] по методикам поверки согласно ГОСТ 8.581-2003, ГОСТ 8.582-2003 [3, 4].

При поверке РЭ АРН по 1 разряду значения относительной погрешности результатов измерений АРН  $\delta_n$  не должны превышать 4 %.  $\delta_n$  вычисляется по формуле:

$$\delta_n = 2S_\Sigma \quad (1)$$

Значение погрешности поверки РЭ АРН, выражаемое в виде относительного среднего квадратического отклонения (СКО), рассчитывается по формуле:

$$S_\Sigma = \sqrt{S_R^2 + S_o^2 + \frac{1}{3}\theta_v^2 + \frac{1}{3}\theta_k^2 + \frac{1}{3}\theta_r^2}, \quad (2)$$

где  $S_R$  – СКО результатов измерений отношений скоростей счёта импульсов от эталонного и поверяемого источников с поправками на фон и разрешающее (мёртвое) время;

$S_o$  – выраженная в виде СКО суммарная погрешность эталонного источника;

$\theta_v$  – неисключённая систематическая погрешность (НСП), обусловленная нестабильностью компаратора во времени;

$\theta_k$  – НСП, обусловленная неравномерностью активного слоя источников и детектора компаратора;

$\theta_r$  – НСП, обусловленная неточностью определения разрешающего (мёртвого) времени компаратора.

Экспериментальным путём были получены все составляющие  $S_\Sigma$ , максимальные значения которых и результаты расчётов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип компаратора	Измеряемый параметр, %						
	$S_R$	$S_o$	$\theta_\nu$	$\theta_K$	$\theta_\tau$	$S_\Sigma$	$\delta_n$
Альфа	0,95	1,7	0,14	0,61	0,08	1,98	3,96
Бета	0,65	1,7	0,18	1,36	0,02	1,98	3,97

Анализ составляющих погрешности передачи единицы АРН показал, что одной из основных является НСП, обусловленная неравномерностью активного слоя источников и детектора компаратора  $\theta_K$ .  $\theta_K$  возникает в тех компараторах, в которых чувствительность всего детектора в целом различна для разных участков активной поверхности источников. В основном неравномерность активного слоя нормируется для источников с активной поверхностью 100 и 160 см<sup>2</sup> (5П9, 5СО и 6П9, 6СО). Значение  $\theta_K$  для указанных источников определяется в соответствии с [3, 4] по формуле:

$$\theta_K = 1,1 \sqrt{\eta_o^2 + \eta_n^2} \frac{s_o}{S_o} \frac{|1 - \xi' / \xi|}{1 - s_o / S_o} \quad (3)$$

где  $\eta_o$  и  $\eta_n$  – неравномерность активного слоя у эталонного и поверяемого источников соответственно (по паспорту  $\eta \leq 20$  %), %;

$s_o$  и  $S_o$  – площадь с максимальным отклонением АРН и площадь активной поверхности всего источника соответственно. Отношение  $s_o / S_o$  принимают равным 0,06 и 0,1 для источников с активной поверхностью 100 и 160 см<sup>2</sup> соответственно;

$\xi' / \xi$  – относительное изменение чувствительности всего детектора для краевых участков источников по отношению к среднему при заданных расстояниях между источником и детектором.

Согласно [3, 4] отношение  $\xi' / \xi$  определяется перемещением источников в двух взаимно перпендикулярных направлениях в пределах площади активной поверхности источника с измерением скорости счёта импульсов  $n_i$  в каждой точке. Величины  $\eta_o$  и  $\eta_n$  определяются и нормируются только заводом-изготовителем источников в виде  $\eta \leq 20$  %.

Предлагаемый метод уменьшения составляющей погрешности измерений активности радионуклидов, обусловленной неравномерностью активного слоя источников и чувствительности детектора, можно условно разделить на два этапа:

1) Определять значение  $\xi' / \xi$  перемещением источников минимальной площади в восьми направлениях относительно центра детектора.

2) В связи со сложностью и высокой трудоёмкостью определения точного значения  $\eta$  прямыми измерениями предлагается косвенно

оценивать величины  $\eta_o$  и  $\eta_n$  при вращении источников вокруг своей оси с измерением скорости счёта импульсов.

1-й этап. Отношение  $\xi'/\xi$  определялось перемещением источников 1П9 (1СО) и 2П9 (2СО) в восьми направлениях относительно центра детектора в пределах максимальной площади активной поверхности источника (6П9, 6СО) с измерением скорости счёта импульсов  $n_i$  от источника в каждой точке. Выбор большего количества направлений позволяет повысить достоверность определения  $\xi'/\xi$  и определить полную картину неравномерности чувствительности детектора. Отношение  $\xi'/\xi$  вычислялось по формуле:

$$\xi'/\xi = n_i/\bar{n} \quad (4)$$

где  $\bar{n}$  – среднее значение скоростей счёта импульсов по всем точкам,  $\text{с}^{-1}$ .

В качестве  $\xi'/\xi$  выбирается значение  $n_i/\bar{n}$  с наибольшим отклонением от единицы.

В ходе исследований компараторов на данном этапе определены значения неравномерности чувствительности детекторов и проведён расчёт значений  $\theta_k$  для компараторов, которые показали, что определение относительного изменения чувствительности детектора при измерениях  $n_i$  от источников минимальной площади в восьми направлениях, а не в двух (как это предписывает [3, 4]), позволяет уменьшить  $\theta_k$  до 45 %. При этом увеличение числа измерений  $n_i$  приводит к увеличению продолжительности поверки компаратора (на 15-20 %). Однако определение  $\theta_k$  требуется лишь 1 раз в 2 года (срок межповерочного интервала компаратора). Поэтому на фоне средней загрузки компаратора при проведении поверки РЭ ( $\approx 400$  РЭ в год) за указанный период времени данное увеличение трудозатрат ничтожно мало и составляет 0,1 %.

2-й этап. В общем случае неравномерность нанесения активного слоя источников  $\eta$  определяется согласно [5] путём измерений значений скорости счёта импульсов в  $i$ -ой точке поверхности источника и последующего определения их максимального отклонения относительно среднего значения скорости счёта импульсов. Данная величина для эталонных и поверяемых источников  $\eta_o$  и  $\eta_n$  определяется и нормируется только заводом-изготовителем источников в виде  $\eta \leq 20$  % и при их дальнейшей эксплуатации не контролируется. Так, в [3, 4] не регламентируются методы определения  $\eta$  или оценка её влияния на составляющую НСП при проведении поверки источников ионизирующих излучений (ИИИ) типа 5П9 (5СО) и 6П9 (6СО). Однако согласно формуле (3), очевидно, что при условии более точного определения значения  $\eta$  можно добиться уменьшения  $\theta_k$ .

Исследования проводились следующим образом. Для нивелирования вклада анизотропии источников в составляющую НСП необходимо:

а) зафиксировать первоначальное значение скорости счёта импульсов  $n_0$ ;

б) непрерывно или бесконечно много раз поворачивать источник вокруг своей оси с шагом, стремящимся к нулю, до достижения угла в  $360^\circ$ ;

в) на каждом шагу проводить измерения  $n_i$ , определять среднее значение скорости счёта импульсов  $\bar{n}$  и погрешность измерений  $\delta_i$  в каждой точке относительно  $n_0$ ;

г) оценить уменьшение  $\eta_i$ .

Критерием наличия неравномерности активного слоя источника являлось не менее чем двойное превышение  $\delta_i$  относительно значения нестабильности компаратора  $\delta_{iH}$ . Затем для всех ИИИ определялись модули средних относительных НСП  $\delta_{срi}$ , величина которых в соответствии с [6] позволяет оценить вклад значения  $\eta$  в суммарную погрешность поверки РЭ АРН.

$$\delta_{срi} = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \left( \left| \frac{(\bar{n} - n_i)}{\bar{n}} \right| 100 - |\delta_{iH}| \right)_i}{i} \quad (5)$$

Сделано допущение, что максимальное значение величины  $\delta_i$  прямо пропорционально величине  $\eta$ . Данное допущение описывается зависимостью:

$$\eta = \kappa \delta_i \quad (6)$$

где  $\kappa$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от неравномерности детектора (const. в пределах межповерочного интервала компаратора).

Поэтому, уменьшая  $\delta_i$  на основе вращения источника в  $N$  раз, можно также получить уменьшение  $\eta$  в  $N$  раз. Данную величину можно оценить с помощью выражения:

$$N = \delta_i / \delta_{ср} \quad (7)$$

Экспериментальным исследованиям подверглись более 80 источников 5П9, 5СО и 6П9, 6СО. Результаты расчётов по оценке анизотропии источников приведены в таблице 2.

Таблица 2

№	Наименование характеристики	Значение характеристики, %			
		Для 5П9	Для 5СО	Для 6П9	Для 6СО
1	Доля неравномерных ИИИ	92	40	30	17
2	Диапазон $\delta_i$	0,3 - 9,9	0,4 - 1,7	0,5 - 2,1	0,2 - 2,0
3	Диапазон $\delta_{ср}$	0,1 - 4,4	0,1 - 0,8	0,1 - 0,7	0,1 - 0,5
4	$N_{\max}$	2,25	2,13	3	4

Экспериментальная апробация предложенного метода показала, что оценка анизотропии источников позволяет уменьшить  $\theta_k$  на 20-80 %. Данные измерения достаточно проводить один раз за весь срок эксплуатации источников.

Полученные с помощью вышеуказанного метода результаты были подтверждены на аппаратуре воспроизведения единиц активности и внешнего излучения альфа-бета-излучающих радионуклидов из состава вторичного эталона.

Таким образом, в результате проведённых исследований определено, что применение предложенного метода при периодической поверке компараторов и радиометрических источников позволяет уменьшить погрешность передачи единицы АРН на 5-10 %.

#### Литература

1. Юдин М.Ф., Кармалицин Н.И. и др. Измерения активности радионуклидов. –Екатеринбург: Полиграфист, 1999;
2. Караваев Ф.М. Измерения активности радионуклидов. –М.: Изд-во стандартов, 1972;
3. ГОСТ 8.581-2003. Источники альфа-излучения радиометрические эталонные. Методика поверки. –М.: Издательство стандартов, 2003. – 13 с.;
4. ГОСТ 8.582-2003. Источники бета-излучения радиометрические эталонные. Методика поверки. –М.: Издательство стандартов, 2003. – 13 с.;
5. Демченко Н.Ф. Разработка средств и методов радиационного контроля при производстве радионуклидных источников. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. –Дмитровград, 2007;
6. Кондрашов А.П., Шестопалов Е.В. Основы физического эксперимента и математическая обработка результатов измерений. – М.: Атомиздат, 1977. – 200 с.

## РАЗРАБОТКА ПЛЁНОЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО ДОЗИМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЁННЫХ ДОЗ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 5 ДО 60 КГР

Емельяненко И.А., Гурский М.Н., Громов А.А., Тенишев В.П.,  
Жанжора А.П., Абдулов Р.А.

*ФГУП «ВНИИФТРИ»*

[emelyanenko@vniiftri.ru](mailto:emelyanenko@vniiftri.ru)

В данной работе рассматривается разработка чувствительной, стабильной и устойчивой радиохромной композиции на основе азокрасителя 4-диметиламиноазобензола с целью создания Государственного стандартного образца для измерения поглощённой дозы фотонного и электронного излучений в диапазоне от 5 до 60 кГр.

При исследовании проводилось облучение различных плёночных композиций на Государственном первичном специальном эталоне единицы мощности поглощённой дозы интенсивного фотонного, электронного и бета-излучений для радиационных технологий ГЭТ 209-2014 (ФГУП «ВНИИФТРИ»). Пленочные образцы представляют собой полимерные пленки, состоящие из радиационно-чувствительного слоя, нанесённого на прозрачный лавсан толщиной 100 мкм. Они изготавливались на специальных поливочных машинах, соблюдая строго температуру и влажность в ЗАО БИТ г. Переславль-Залесский.

В работе использовался спектрофотометрический метод измерения. Проводилось измерение оптической плотности облучённых образцов по отношению к необлучённому на спектрофотометре SPECORD 210 Plus компании Analytik Jena с абсолютной погрешностью 0,2 % по пропусканию. Далее по полученным экспериментальным данным проводилось построение градуировочной характеристики зависимости оптической плотности облучённых образцов от величины поглощённой дозы. При облучении экспериментальных образцов спектр оптического поглощения, характерный для данного азокрасителя, не деформируется в области длины волны 540 нм в зависимости от величины поглощённой дозы, что позволяет использовать данный краситель и выбрать длину волны 540 нм в качестве рабочей для последующих измерений.

В результате экспериментов был сделан вывод, что для данного диапазона доз подходит радиохромная композиция с концентрацией красителя: 5 или 6 г, толщиной радиационно-чувствительного слоя 8 мкм и с концентрацией гексахлорэтана 4,3 г в растворе. Для данной плёнки был

обнаружен большой «постэффект». В связи с большим «постэффектом» за 1 сутки в дальнейшем для уменьшения «постэффекта» было принято решение исследовать радиохромную композицию без гексахлорэтана со стабилизирующими добавками: фенол, бензол. В результате экспериментов был сделан вывод, что введение стабилизирующей добавки в виде бензола уменьшает «постэффект» на 2 %.

В итоге работы для дальнейших исследований принята к рассмотрению радиохромная композиция с толщиной радиационно-чувствительного слоя от 8 до 10 мкм, в которой в качестве азокрасителя выступает 4-диметиламиноазобензол с массой 7 г в растворе без гексахлорэтана и с бензолом в качестве стабилизирующей добавки.

# ЭТАЛОНЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рогозев А.Б., Тычинкин Ю.А., Титов Э.А.

*ЗАО «РИТВЕРЦ»*

## **Вступление**

Как известно, одной из задач метрологии является создание эталонов.

В метрологии измерений ионизирующих излучений, как правило, используются эталоны активности и потока фотонов (частиц).

ЗАО «РИТВЕРЦ», занимаясь разработкой и изготовлением радионуклидной продукции, значительное внимание уделяет эталонным, калибровочным и контрольным источникам разных типов. В большинстве случаев, когда речь идет об эталонах, мы производим данную продукцию в кооперации с ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (ВНИИМ). За годы многолетнего сотрудничества мы организовали плодотворное взаимодействие по следующим направлениям:

**1. Источники типа ОСГИ-Р и ОСГИ-РТ.** Конструкция источников разработана много лет назад и всем хорошо знакома. До настоящего времени мы выпускали только источники типа ОСГИ-Р. Проанализировав рынок выпускаемых в России и за рубежом эталонных источников и изучив пожелания потребителей, мы внесли некоторые доработки в конструкцию и технологию, что привело к созданию нового типа ОСГИ-РТ. Отличия источников ОСГИ-РТ заключаются в следующем:

- увеличены классы прочности – 35242 вместо 35141,
- к номенклатуре добавлены мультинуклидные источники,
- добавлены эталоны 0-го разряда.

Идея мультинуклидного источника не нова и заключается в том, что довольно часто при оперативной калибровке (поверке) спектрометрической аппаратуры может возникать потребность в измерении сразу нескольких радионуклидов. Для этой цели нами был разработан и выпускается источник, содержащий четыре радионуклида (Y-88, Ba-133, Eu-152, Am-241). Естественно, возможны и другие комбинации по составу радионуклидов. Также в последнее время все более актуальной становится задача производства и поставки для предприятий отрасли вторичных эталонов активности (рабочих эталонов 0-го разряда). Для этого на базе ОСГИ-РТ разрабатываются источники с погрешность аттестации не более 1.5 % ( $p=0.95$ ).

Разработка и изготовление источников типа ОСГИ-РТ идет в тесном сотрудничестве с ВНИИМ, начиная со стадии эталонирования исходных растворов и заканчивая аттестацией источников. Таким образом, у пользователей ОСГИ-РТ появляется возможность дополнительно иметь:

- гарантию работоспособности источников в более жестких условиях эксплуатации;

- мультинуклидные источники, которые позволяют измерять сразу нескольких радионуклидов, что снижает систематическую погрешность измерений и уменьшает время калибровки спектрометра;

- эталоны активности 0-го разряда, которые дают возможность использовать эти источники для работ по калибровке/поверке источников фотонного излучения, аттестуемых по 1-му и 2-му разрядам.

**2. Источники типа ОСГИ-П**, которые являются альтернативой привычным источникам типа ОСГИ-Р на пленках. Актуальность источника возникает тогда, когда появляются задачи по упрочнению корпуса и минимизации размеров активной части при сохранении привычных геометрических размеров.

Признавая несомненно большие достоинства данной конструкции, нельзя не отметить и явный недостаток – поглощение фотонного излучения в материале источника и активной части. Хотя используемые материалы – оргстекло и пористая керамика ВеО – имеют небольшую плотность, но в области малой энергии ослабление будет заметным.

Для определения величины поглощения была проведена совместная работа с ВНИИМ, где использовались как расчетный, так и экспериментальный пути. В результате мы получили коэффициенты пропускания фотонного излучения для всех радионуклидов, входящих в номенклатуру источников типа ОСГИ.

Для учета ослабления выхода фотонов из источников ОСГИ-П программа SpectraLineXX (ООО «ЛСРМ», п. Менделеево) была адаптирована путем внесения соответствующего материала (полиметилакрилат) в базу используемых материалов, что позволило использовать их для калибровки детекторов по эффективности регистрации.

Таким образом, конструкция источников ОСГИ-П предоставляет дополнительные возможности:

- гарантировать работоспособность источников в жестких условиях эксплуатации,

- за счет значительного упрочнения корпуса источника получить возможность закладывать повышенные номиналы активности по сравнению с источниками на пленках – увеличить назначенный срок службы источников.

На данный момент источники не внесены в реестр СИ, что ограничивает область их применения функциями контроля и калибровки.

**3. Источники типа ОИДК-Р** были разработаны для обеспечения процедур контроля и калибровки радионуклидных калибраторов, активно применяемых в ядерной медицине. Они применяются для периодического

контроля чувствительности и долговременной стабильности измерений таких хорошо известных приборов как «CURIEMENTOR 2-4», РИС А1 и др. в соответствии с рекомендациями ГОСТ ИЕС 61303-2011. Исторически сложилось, что используются два разных дизайна, и оба представлены в нашей номенклатуре.

Источники ОИДК-Р выпускаются как контрольные (суммарная погрешность 5 - 7 %), так и калибровочные, с оформлением сертификата о калибровке во ВНИИМ с погрешностью до 3 %.

Таким образом, источник в первом случае служит для регулярной проверки работоспособности, а во втором для периодической поверки приборов.

**4.** Кроме радионуклидных источников, мы выпускаем **ОРР** (эталонные радионуклидные растворы), которые производятся на базе гамма-излучающих радионуклидов. Приготовление растворов нужной консистенции, взвешивание и упаковка в первичную фасовку проводится нашей фирмой, а аттестация с выдачей или свидетельства или сертификата о калибровке ОРР – ВНИИМ. Для изготовления ОРР используются растворы азотной или соляной кислоты нужной молярности. В номенклатуру растворов входят до 19 радионуклидов. Учитывая разнообразные требования к объему раствора, возможен широкий спектр первичной упаковки растворов.

**Заключение.** Это основные проекты, по которым сегодня идет активное взаимодействие ЗАО «РИТВЕРЦ» с ВНИИМ. На основании опыта нашего взаимодействия, можно наблюдать определенные преимущества такой кооперации, когда каждая из сторон специализируется на своей части производственного процесса. Таким образом, могут достигаться максимально возможное качество выполняемых работ и экономический эффект.

# ПРИМЕНЕНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ФОТОННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ ТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.В. Берлянд

*ФГУП «ВНИИФТРИ»*

sander.00007@gmail.com

Протонная терапия является эффективной альтернативой лучевой терапии с использованием высокоэнергетического фотонного и электронного излучений. Ее преимущество обусловлено наличием в глубинном распределении поглощенной дозы в среде пика Брэгга, где поглощенная доза имеет максимальное значение, крутыми градиентами дозного распределения и отсутствием излучения за пиком Брэгга, а также незначительным боковым рассеянием протонов. Добавляя перед облучаемым объектом дополнительные слои материала, можно сдвигать пик Брэгга, останавливая пучок протонов на заданной глубине проникновения в соответствии с местоположением облучаемой мишени.

Стандартная дозиметрия протонного излучения базируется на применении калориметров, ионизационных камер (ИК), цилиндров Фарадея, активационных детекторов [1, 3, 4]. Для относительной дозиметрии на протонных пучках, кроме ИК, используются кремниевые полупроводниковые детекторы (ППД) [2], алмазные и аланиновые детекторы [1]. Для обеспечения единства дозиметрических измерений протонного излучения необходимо обеспечить прослеживаемость результатов измерений до национального первичного эталона. На сегодняшний день национальных эталонов, воспроизводящих единицу поглощенной дозы протонного излучения, не существует. В России применяется Государственный первичный эталон поглощенной дозы фотонного и электронного излучений ГЭТ 38-2011 и соответствующая Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы [5]. В докладе рассматриваются результаты дозиметрии клинического протонного излучения на ускорителе синхротрона Института Теоретической и Экспериментальной Физики (ФГБУ «ГНЦ РФ ИТЭФ» НИЦ «Курчатовский институт»), полученные с помощью ионизационной камеры, комплекта термолюминесцентных детекторов, калиброванных в поле гамма-излучения Co-60 на Государственном первичном эталоне ГЭТ 38-2011 во ФГУП «ВНИИФТРИ» и аппаратно-измерительного комплекса ИТЭФ. Специфика протонного пучка синхротрона ИТЭФ заключается в том, что импульсы излучения редкие – один раз в 4 с и

короткие – длительность импульса 100 нс. В каждом импульсе  $10^9 - 10^{11}$  протонов. Поэтому мощность поглощенной дозы в импульсе очень высокая.

Ионизационная камера и термолюминесцентные дозиметры при калибровке размещались в водном фантоме на глубине 5 г/см<sup>2</sup>. В результате калибровки были установлены коэффициенты чувствительности для этих дозиметров:

для ионизационной камеры:

$$N_{ИКСо-60} = D_{Со-60} / M_{ИКСо-60} \quad (1)$$

для ТЛД:

$$N_{ТЛДСо-60} = D_{Со-60} / M_{ТЛДСо-60} \quad (2)$$

где  $D_{Со-60}$  – значение поглощенной дозы гамма-излучения Со-60 в воде в точке водного фантома, определенное с помощью калориметра;

$M_{ИКСо-60}$  и  $M_{ТЛДСо-60}$  – показания ионизационной камеры и ТЛД в поле гамма-излучения Со-60 соответственно.

При измерениях в поле протонного пучка ППД ионизационная камера и ТЛД размещаются в водном фантоме в точке, находящейся на середине плато модифицированного пика Брэгга. Значение поглощенной дозы протонного излучения в воде  $D_{пр}$  при использовании ионизационной камеры определяется в соответствии с рекомендациями [8] из соотношения:

$$D_{пр} = \frac{M_{ИК пр}}{N_{ИК Со-60}} \cdot \frac{W_{пр}}{W_{Со-60}} \cdot \frac{S_{\rho \text{ вод, возд пр}}}{S_{\rho \text{ вод, возд Со-60}}} \cdot P_{пр} \cdot K_p \quad (3)$$

где  $M_{ИК пр}$  – показания дозиметра с ионизационной камерой в протонном пучке;

$W_{пр}$  – энергия ионообразования в воздухе для протонов;

$W_{Со-60}$  – энергия ионообразования в воздухе для гамма-излучения;

$S_{\rho \text{ вод, возд пр}}$  – отношение тормозных способностей воды и воздуха для протонов;

$S_{\rho \text{ вод, возд Со-60}}$  – отношение тормозных способностей воды и воздуха для гамма-излучения Со-60;

$K_p$  – поправочный коэффициент на рекомбинацию ионов;

$P_{пр}$  – коэффициент возмущения флюенса протонов в результате внесения ионизационной камеры в водный фантом.

Для протонного пучка синхротрона использовалась плоскопараллельная ионизационная камера типа РРС05. Выбор типа

камеры обусловлен стремлением уменьшить составляющую погрешности результата измерений, обусловленную рекомбинацией ионов в ионизационной камере: межэлектродный зазор в камере, составляет всего 0,8 мм. Мощность дозы в импульсе большая – более  $10^4$  Гр/с. Ионизационная камера типа PRC05 имеет очень маленький объем –  $0,05 \text{ см}^3$ . Поэтому при одинаковой эффективности собирания ионов эта камера позволяет измерять мощности дозы на 3 порядка больше, чем наперстковые фермеровские камеры. Поправочный коэффициент на рекомбинацию ионов для импульсного пучка определяется с помощью метода двух напряжений [13], в соответствии с которым существует линейная зависимость между обратными значениями ионизационного тока и высокого напряжения на камере. Для всех пучков фотонов и электронов принято значение  $W_{Co-60} = 33,97$  Дж/Кл [9-11], для протонного излучения рекомендовано значение  $W_{np} = 34,23$  Дж/Кл [5].

Значение  $S_{\rho}^{вод, возд Co-60}$  составляет 1,133 для гамма-излучения Co-60.

Это значение было рассчитано с применением данных о тормозных способностях моноэнергетических электронов, приведенных в МКРЕ-37 [12]. Для протонного излучения данного качества в TRS 398 [8] рекомендовано значение  $S_{\rho}^{вод, возд np}$  равное 1,137. Возмущением

флюенса протонов ионизационной камерой можно пренебречь и считать  $P_{np} = 1$  (TRS 398).

Значение поглощенной дозы протонного излучения в воде  $D_{np}$  при использовании ТЛД определяется из схожего соотношения:

$$D_{np} = \frac{M_{ТЛД np}}{N_{ТЛД Co-60}} \cdot \frac{W_{np LiF}}{W_{Co-60 LiF}} \cdot \frac{S_{\rho}^{вод, LiF np}}{S_{\rho}^{вод, LiF Co-60}} \cdot P_{np} \quad (4)$$

где  $M_{ТЛД np}$  – показания ТЛД в протонном пучке;

$W_{np LiF}$  – энергия возбуждения для LiF для протонов;

$W_{Co-60 LiF}$  – энергия возбуждения для LiF для гамма-излучения;

$S_{\rho}^{вод, LiF np}$  – отношение тормозных способностей воды и LiF для протонов;

$S_{\rho}^{вод, LiF Co-60}$  – отношение тормозных способностей воды и LiF для гамма-излучения Co-60;

$R_{пр}$  – коэффициент возмущения флюенса протонов в результате внесения ТЛД в водный фантом.

Бюджет неопределенности определения поглощенной дозы протонного излучения в воде с помощью ионизационной камеры (типа В с коэффициентом расширения  $K = 2$ ) приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Бюджет неопределенности определения поглощенной дозы протонного излучения в воде.

Источник неопределенности	Значение расширенной неопределенности, %
Калибровочный коэффициент ИК по поглощенной дозе в воде для $Co-60 - N_{ИКCo-60}$	1,0
Отношение тормозных способностей воды и воздуха для протонного излучения и гамма-излучения $Co-60$ $\frac{S \rho_{вод,возд,пр}}{S \rho_{вод,возд,Co-60}}$	2,2
Соответствие $\frac{S \rho_{вод,возд,пр}}{S \rho_{вод,возд,Co-60}}$ качеству пучка	0,8
Отношение энергии ионообразования в воздухе для гамма-излучения и протонного излучения $\frac{W_{пр}}{W_{Co-60}}$	0,5
Коэффициент возмущения $R_{пр}$	0,4
Стабильность дозового монитора	0,5
Поправка на рекомбинацию, давление, температуру	0,2
Суммарное значение	2,7

Неопределенность типа А, выраженная в виде СКО, составляет 0,5 %, расширенная неопределенность типа А составляет 1 % ( $K = 2$ ).

Суммарная неопределенность результата определения поглощенной дозы протонного излучения в воде с помощью ионизационной камеры составляет 2,8 %. Аналогичные расчеты при использовании ТЛД (одновременно облучается комплект из 25 детекторов) дают значения суммарной неопределенности определения поглощенной дозы в воде 4,5 %. Калибровка проводилась при начальной энергии протонного пучка, выводимого из кольца ускорителя  $E_0 = 220$  МэВ. Средняя энергия протонного пучка после всех элементов формирования поля была  $E = 200$  МэВ.

Относительная погрешность определения использованных в работе кремниевых полупроводниковых детекторов (ППД) оценивается менее чем

в 2 %. Отсюда суммарная погрешность определения величины поглощенной дозы в воде от протонного излучения в диапазоне энергий  $E_p$  (50-200) МэВ с помощью АИК не превышает 4,3 %.

Результаты измерений поглощенной дозы протонного излучения в точке водного фантома с использованием различных методов и средств измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений поглощенной дозы протонного излучения.

Средство измерений	Измеренное значение поглощенной дозы, Д, сГр	Расширенная неопределенность результата измерений, U, %
Ионизационная камера	21,00	2,7
ТЛД	20,51	4,5
АИК	20,77	4,3

Из таблицы видно, что результаты измерений, полученных с помощью ионизационной камеры и ТЛД, прокалиброванных на Государственном первичном эталоне поглощенной дозы фотонного излучения, в поле гамма-излучения  $Co-60$ , и с помощью независимого метода, основанного на определении флюенса протонного излучения с помощью активационного детектора, совпадают в пределах оцененных неопределенностей.

#### Литература

- 1 ICRU 2007 Prescribing, recording, and reporting proton-beam therapy. ICRU Report 78 (Oxford: Oxford University Press)
- 2 Koehler, A.M. Dosimetry of proton beams using small diodes, Radiat. Res. Suppl.7 (1967) 53.
- 3 Verhey, L., et al., The determination of the absorbed dose in a proton beam for purpose of charged-particle radiation therapy, Radiat. Res.79 (1979) 34-54.
- 4 Vynckier, S., et al., The proton therapy program at the cyclotron Cyclone of Louvain-la-Neuve (first dosimetric results), J. Eur. Radiother. 5 (1984) 245-247.
- 5 Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц мощности поглощенной дозы фотонного и электронного излучений, его совершенствование и результаты ключевых сличений / А.В. Берлянд, В.А. Берлянд, Ю.И. Брегадзе // Измерительная техника. – Москва: Стандартинформ, 2010. – №2. – с. 3.

- 6 Nichiporov D., et al. Measurement of the activity of  $^{11}\text{C}$  and  $^{22}\text{Na}$  sources using 4- $\pi$ - $\beta$ - $\gamma$  coincidence system. *Appl. Radiat. Isot.* 60. 2004, p.703-716
- 7 V. Kostjuchenko, D. Nichiporov. Measurement of the  $^{12}\text{C}(\text{p,pn})^{11}\text{C}$  reaction from 95 to 200 MeV. *Applied Radiation and Isotopes*. Vol. 44, 9, 1993, p. 1173-1175.
- 8 IAEA TRS-398 Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water: Technical report. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.
- 9 Boutillon, M. Re-evaluation of the W for electrons in dry air // M. Boutillon, A.M. Perroche-Roux // *Phys. Med. Biol.* – 1987. – № 32
- 10 CCEMRI(I) Effect of a change of stopping-power values on the w values recommended by ICRU for electrons in dry air: Report. – Paris: BIPM, 1985.
- 11 Niatel, M.T. Two determinations of W for electrons in dry air / M.T. Niatel, A.M. Perroche-Roux, M. Boutillon // *Phys. Med. Biol.* – 1985. – № 30.
- 12 ICRU Stopping Powers for Electrons and Positrons: Report № 37. – Bethesda, MD: ICRU, 1984.
- 13 IAEA TRS-277 Absorbed dose determination in photon and electron beams: An international code of practice: Technical report. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1987.
- 14 Ничипоров Д.Ф. Абсолютная дозиметрия медицинского протонного пучка ИТЭФ на основе активационного метода. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ИТЭФ, М, 2001

# КАЛИБРОВКА СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО БЛОКА-КОМПАРАТОРА В НИЗКОИНТЕНСИВНЫХ ПОЛЯХ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО МОЩНОСТИ ДОЗЫ

Лукашевич Р.В., Гузов В.Д., Кожемякин В.А.

*Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»*

*г. Минск, Республика Беларусь*

[lukashevich@atomtex.com](mailto:lukashevich@atomtex.com)

Рассмотрен метод калибровки сцинтилляционного блока-компаратора по мощности дозы в низкоинтенсивных полях фотонного излучения для задач радиационного мониторинга согласно рекомендациям международных технических стандартов. Представлены основные результаты исследований чувствительности детектора к различным компонентам фонового излучения, и апробация методики калибровки блока-компаратора на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ». Приведены результаты калибровки блока-компаратора в низкофоновой лаборатории в соляной шахте в Румынии.

## **Введение**

Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) на уровне естественного радиационного фона является одной из основных задач радиационного мониторинга. При осуществлении радиационного мониторинга крайне важно получать информацию о малейшем превышении техногенного радиационного фона по отношению к естественному фоновому излучению. Для этого необходимо использовать измерительные средства, обладающие высокой чувствительностью, низким уровнем собственного фона и высокой временной стабильностью. В этом случае важной проблемой, которую необходимо решить при калибровке дозиметрических приборов, является нижний уровень измерительного диапазона, который должен включать значения, соответствующие естественному фону окружающей среды, т.е. 0,05 - 0,1 мкЗв/ч.

Использование высокочувствительных дозиметров на базе сцинтилляционных блоков детектирования становится привлекательным для оценки МАЭД ниже 0,1 мкЗв/ч. При том, что ГОСТ Р 8.804-2012 [1] не оговаривает диапазон измерений ниже 0,3 мкЗв/ч, стандарты ИЕС 61017:2016 и ИЕС 60846-1:2009 [2, 3] рекомендуют нижний предел диапазона измерений МАЭД при контроле радиационной обстановки в окружающей среде на уровне 0,03 мкЗв/ч.

В этой связи возникает необходимость в калибровке дозиметров по фотонному излучению в диапазоне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч. Для этого необходимо метрологически обеспечить значение МАЭД на уровне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч,

т.е. создать эталонное низкоинтенсивное поле фотонного излучения и экспериментально подтвердить линейность дозовой характеристики дозиметрических приборов в области ниже 0,1 мкЗв/ч.

### Средства измерения

Для проведения калибровки эталонных полей рентгеновского и гамма-излучений поверочных дозиметрических установок методом сличения в УП «АТОМТЕХ» был разработан высокочувствительный блок-компаратор фотонного излучения БКМГ-АТ1102 на базе серийно выпускаемого сцинтилляционного блока детектирования БДКГ-05К со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) Ø40x40 мм (рисунок 1).

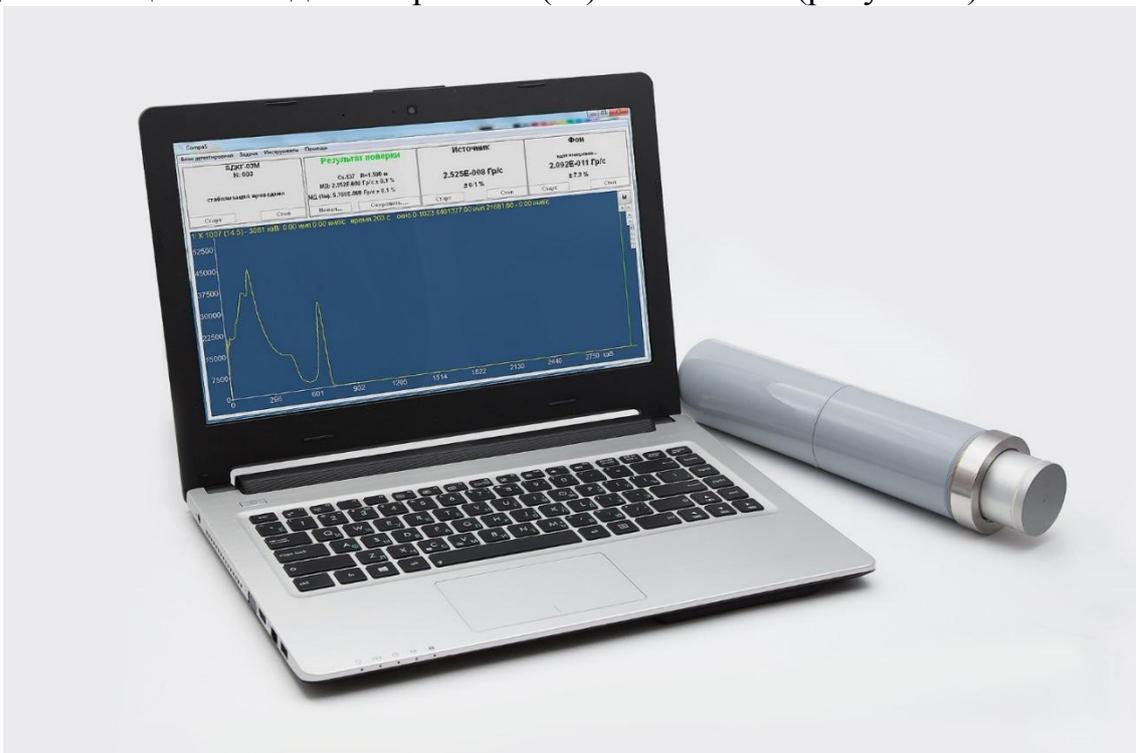


Рисунок 1. Блок-компаратор фотонного излучения БКМГ-АТ1102 и ПК со специализированным ПО

Накопленная при регистрации фотонного излучения информация обрабатывается средствами программного обеспечения и выводится на экран ПК в виде мощности дозы и аппаратурных спектров фотонного излучения.

При измерении мощности дозы использован спектрометрический метод преобразования аппаратурных спектров непосредственно в мощность дозы с помощью корректирующих весовых коэффициентов, значения которых зависят от амплитуды регистрируемых импульсов [4]. В блоке-компараторе реализована возможность измерять в единицах мощности кермы в воздухе, МАЭД и мощности экспозиционной дозы.

Апробация блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в качестве средства измерения мощности дозы проведена на поверочной дозиметрической установке УДГ-АТ110 в УП «АТОМТЕХ» [5] с использованием источников гамма-излучения  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . В результате проведенных измерений были определены основные метрологические характеристики блока-компаратора.

Для подтверждения метрологических характеристик были проведены исследования основных характеристик блока-компаратора, а также калибровка по мощности кермы в воздухе в диапазоне 0,1 – 300 мкГр/ч были выполнены во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» на государственных эталонах РФ [6].

## Метод исследования

Компания «АТОМТЕХ» выпускает широкий спектр аппаратуры для радиационного контроля и ядерных измерений, в том числе высокочувствительные сцинтилляционные блоки детектирования с функцией дозиметра, поэтому задача создать низкоинтенсивные поля фотонного излучения для проверки дозовой характеристики выпускаемых дозиметров, устройств и систем в диапазоне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч весьма актуальна.

Из-за ограничений чувствительности ионизационных камер в области малых уровней мощностей доз, входящих в состав государственных эталонов, а также существенного вклада фонового излучения при измерениях ниже 0,1 мкГр/ч, диапазон аттестованных значений мощности кермы в воздухе на эталонных установках во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» начинается с 0,1 мкГр/ч. Существенный вклад в мощность дозы при измерениях ниже 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч) будет составлять окружающий радиационный фон. В таком случае калибровка или поверка средств измерения в обычных лабораторных условиях практически не возможна, т.к. радиационный фон в лаборатории может изменяться во время проведения измерений из-за множества факторов, что может вносить существенный вклад в результаты измерения около фоновых значений мощности дозы.

Для выполнения калибровки в области ниже 0,1 мкЗв/ч (мкГр/ч), была разработана и апробирована методика калибровки блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в низкоинтенсивных полях фотонного излучения по мощности дозы согласно рекомендациям ИЕС 61017:2016 и ИЕС 60846-1:2009.

Была разработана и апробирована методика калибровки низкоинтенсивных полей гамма-излучения, создаваемых радионуклидным источником  $^{137}\text{Cs}$ , в низкофоновой камере по мощности дозы в диапазоне 0,03 – 0,1 мкЗв/ч с использованием блока-компаратора. Процедура

калибровки сопряжена с корректным измерением и учетом радиационного фона в низкофоновой камере и использованием компенсационного метода измерений (без источника и с источником излучения по разностному эффекту).

## **Результаты исследований**

Апробация разработанных методик калибровки была выполнена на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ».

Заславское водохранилище расположено в 10 км к северо-западу от Минска, на северо-восточных склонах Минской возвышенности. Наибольшая ширина 4,5 километра, наибольшая длина 10 километров. Предварительно была найдена карта глубин Заславского водохранилища и проложен маршрут, максимально удаленный от берегов и максимальной глубиной дна. При проведении измерений использовалась стеклопластиковая лодка типа «Русалка-2», для минимизации вклада при измерении радиационного фона окружающей среды.

В результате были определены отклики блоков-компараторов на составляющие окружающего радиационного фона, согласно рекомендациям технических стандартов, и выполнены предварительная калибровка блока-компаратора на Заславском водохранилище с использованием точечного источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ .

Для того чтобы проверить, насколько показания прибора согласуются с характеристиками поля гамма-излучения в точке измерения, нужно рассчитать, для различных расстояний от источника до прибора, значения мощности дозы и сравнить их с показаниями прибора. Для расчета расстояния используется керма-постоянная для единиц мощности кермы в воздухе (гамма-постоянная - для единиц МАЭД) для конкретного радионуклида (в нашем случае -  $^{137}\text{Cs}$ ).

Значения мощности дозы, рассчитанные таким образом для разных расстояний между источником и блоком-компаратором принимались за действительные значения мощности дозы. Затем на рассчитанных расстояниях выполнялись измерения мощности дозы с использованием блока детектирования из состава блока-компаратора (рисунок 2).



Рисунок 2. Измерение мощности кермы в воздухе от источника гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  на лодке с использованием блока-компаратора БКМГ-АТ1102 на Заславском водохранилище

Для блока-компаратора гамма-излучения БКМГ-АТ1102 были определены три калибровочные точки для источника гамма-излучения с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  и рассчитаны расстояния от источника до детектора с использованием гамма-постоянной для радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . В данных расчетных точках проводили измерения мощности дозы.

Были выполнены измерения мощности дозы в рассчитанных точках с источником и без источника излучения. Путем нахождения разности между значениями мощности дозы с источником и без источника излучения, была определена чувствительность блока-компаратора к излучению источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ .

Далее были рассчитаны значения радиационного фона для блока-компаратора при помощи экстраполяции показаний к нулевой мощности дозы от источника излучения. Полученные значения радиационного фона путем экстраполяции показаний приборов к нулевой мощности дозы от

источника излучения (рисунок 6) хорошо согласуются с измеренными значениями радиационного фона:  $5,688 \pm 0,380$  нГр/ч против  $5,15 \pm 0,69$  нГр/ч.

Апробация методики калибровки блока-компаратора была проведена и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ». Низкофоновая камера конструктивно выполнена из пластин железа толщиной 1 см, полости между которыми заполнены свинцом толщиной 5 см. Снаружи камера дополнительно усилена свинцом (~ 5-7 см) и предназначена для определения собственного фона блоков детектирования и проведения около фоновых измерений мощности дозы от точечных источников гамма-излучения типа ОСГИ в условиях низкого радиационного фона.



Рисунок 3. Общий вид низкофоновой камеры

Сравнительный анализ полученных аппаратных спектров и результатов измерения мощности кермы в воздухе от точечного источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ , полученных с использованием блока-компаратора на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере (за вычетом радиационного фона), показал возможность проведения измерений и калибровок с использованием

точечных источников гамма-излучения в низкофоновой камере (рисунок 4).

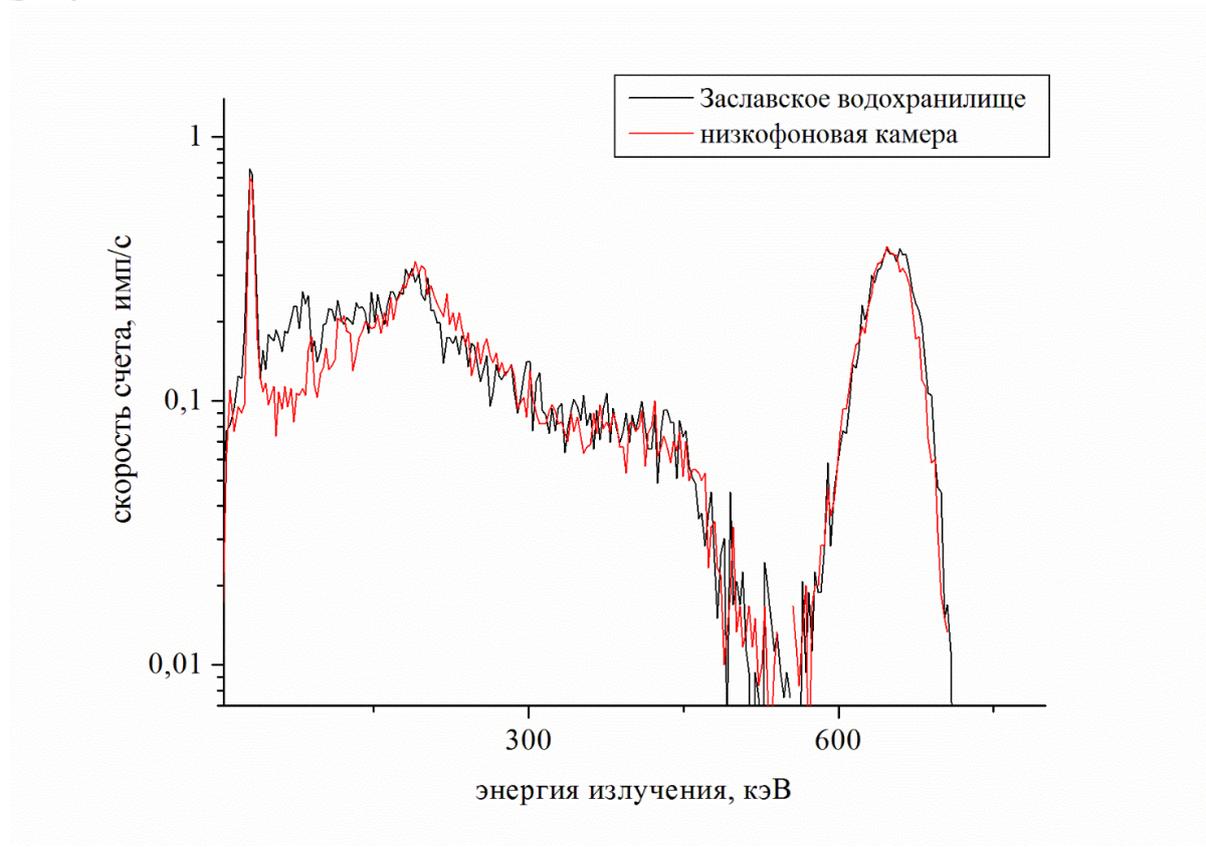


Рисунок 4. Приведенные к одному времени аппаратные спектры от точечного источника гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  при расчетной МАЭД 0,03 мкЗв/ч на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере

Как и на Заславском водохранилище, для блока-компаратора гамма-излучения БКМГ-АТ1102 были определены три калибровочные точки и выполнены измерения мощности дозы и определены чувствительности блоков-компараторов к излучению источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ .

В результате, в расчетных точках были определены калибровочные коэффициенты для блока-компаратора при проведении измерений с использованием точечного источника гамма-излучения типа ОСГИ с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  (таблица 1).

Полученные значения радиационного фона путем экстраполяции показаний приборов к нулевой мощности дозы от источника излучения (рисунок 8) хорошо согласуются с измеренными значениями радиационного фона при наличии источника излучения за защитным свинцовым экраном:  $3,583 \pm 0,532$  нГр/ч против  $3,64 \pm 0,51$  нГр/ч.

Калибровка блока-компаратора в эталонных низкоинтенсивных полях фотонного излучения (0,03 – 0,1 мкЗв/ч) была выполнена в Румынии

в низкофоновом соляном руднике Unirea с использованием вторичного эталона мощности дозы методом компаратора.

Рудник Unirea расположен на глубине 208 м под поверхностью земли, что соответствует толщине водного эквивалента 620 м. Сама шахта представляет собой куполообразную структуру, состоящей из большого количества галерей шириной 34-36 м и высотой 54-58 м (рисунок 5). Следует отметить замечательную стабильность микроокружения, характеризующегося постоянной температурой в течение всего года  $12,5 \pm 0,5$  °С, относительной влажностью 60-65% и атмосферным давлением 730 мм рт. ст. (973,25 гПа).

В 2006 году в шахте была построена и полностью введена в эксплуатацию лаборатория SPLBRL Национального научно-исследовательского института физики и ядерной инженерии им. Хория Хулубея (IFIN-НН). Чтобы не вносить дополнительный вклад в фоновое излучение, лаборатория была построена полностью из поливиниловых профилей. Поскольку уровень фонового излучения в лаборатории достаточно низок, присутствие персонала вблизи детекторов приводит к его увеличению. Чтобы избежать таких нежелательных эффектов, каждая комната отделена от соседних стенами толщиной 0,5 м, изготовленных также из поливиниловых профилей, пространство между которыми заполнено солью высокой чистоты. Температура в лаборатории поддерживается на уровне  $20 \pm 2$  °С.

Внутри лаборатории МАЭД составляет  $1,4 \pm 0,3$  нЗв/ч, что представляет собой идеальные условия для низкофоновых исследований. Нейтронно-активационный анализ породы, проведенный в ОИЯИ в г. Дубне (Российская Федерация), не показал заметных следов калия и тория, а концентрация урана в породе составляет около  $1 \text{ млн}^{-1}$  [7]. В лаборатории установлен калибровочный стенд для решения различных задач по калибровке дозиметрических приборов. Стенд был спроектирован, следуя тем же требованиям, что применялись к стенду в Underground Dosimetry Laboratory (UDO), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) [8]. Стенд оснащен радионуклидными источниками низкой активности  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

Для исследования метрологических характеристик стенда использовался калиброванный в низкофоновой лаборатории UDO в PTB прибор AUTOMESS 6150 AD-6 со сцинтилляционным детектором 6150 AD-b/H в качестве вторичного эталона МАЭД.

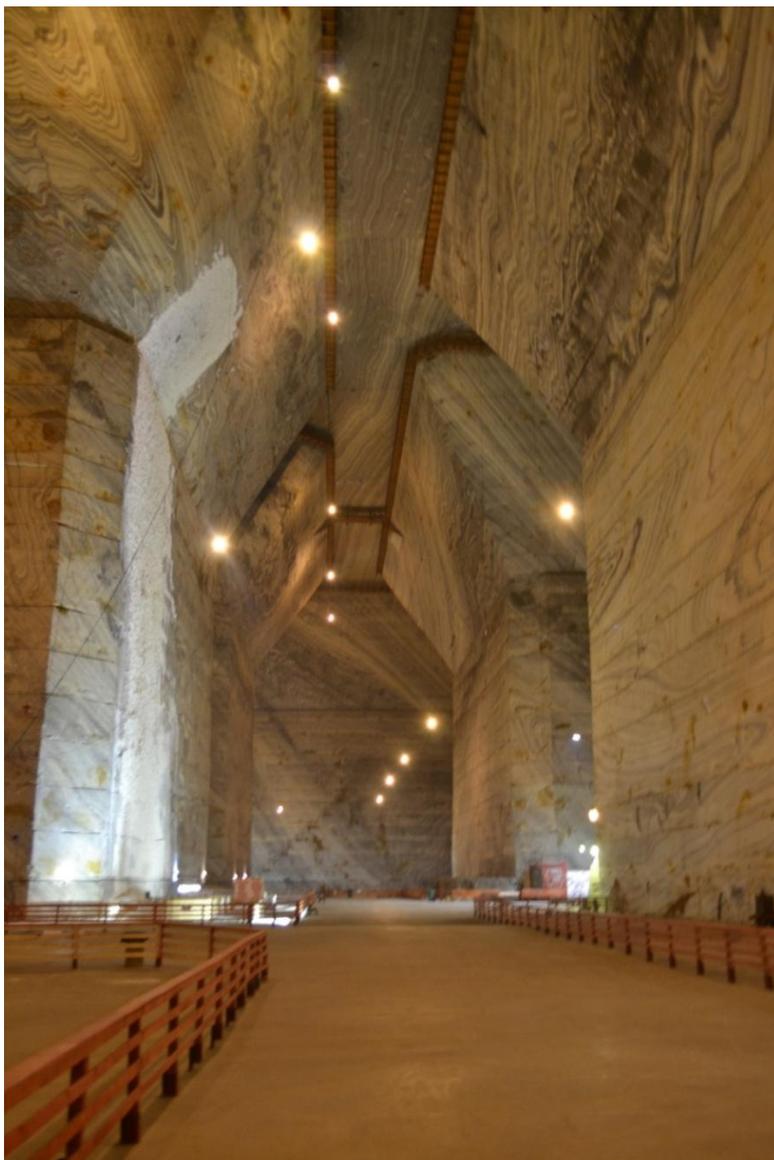


Рисунок 5. Внутри соляной шахты

Калибровка поля излучения стенда по мощности дозы осуществляется методом компаратора с использованием AUTOMESS 6150 AD-6 со сцинтилляционным детектором 6150 AD-b/H, для которого была выполнена калибровка в лаборатории UDO, РТВ в диапазоне 11 – 112 нЗв/ч с использованием источника гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ . При этом расширенная неопределенность ( $k=2$ ) согласно свидетельству о калибровке AUTOMESS 6150 AD-6 не превышает 8,9% для наименьшего значения МАЭД (11 нЗв/ч).

В результате были определены отклики блока-компаратора на гамма-излучение, создаваемое источником с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  и получены калибровочные коэффициенты. Полученные значения калибровочных коэффициентов для МАЭД при измерении гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  для блока-компаратора в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ» и в низкофоновой лаборатории SPLBRL представлены в таблице 1.

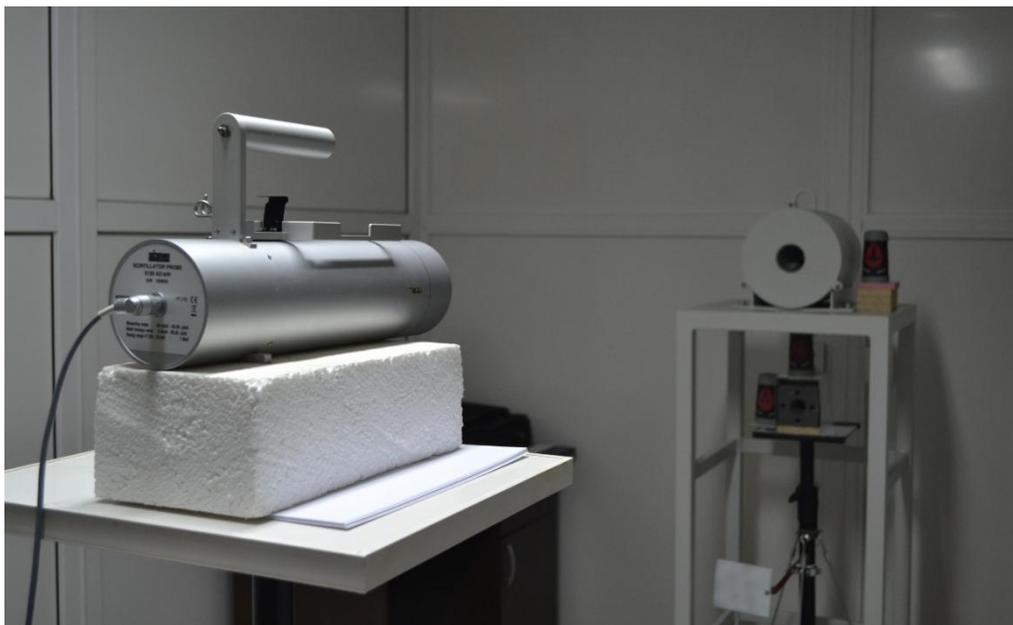


Рисунок 6. Измерение МАЭД на калибровочном стенде с источником гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  с использованием AUTOMESS 6150 AD-6 со сцинтилляционным блоком детектирования 6150 AD-b/H



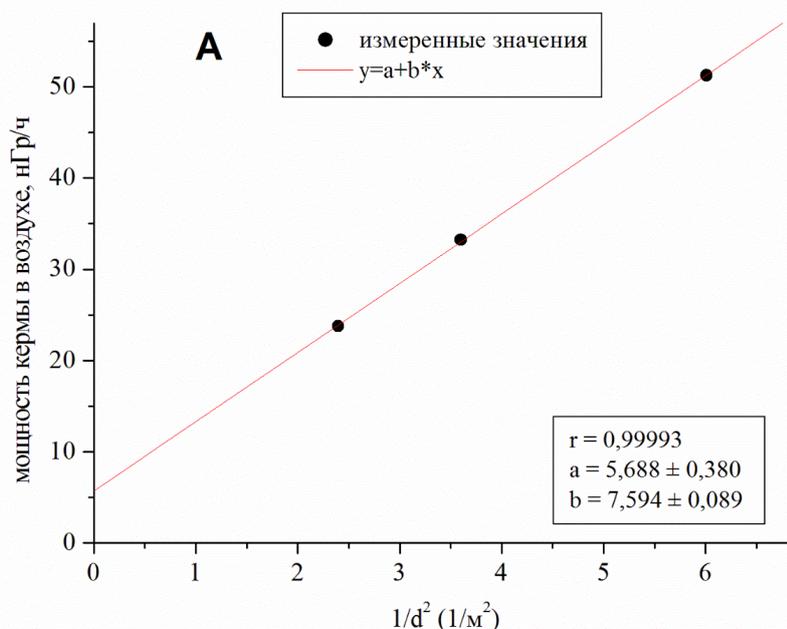
Рисунок 7. Измерение МАЭД на калибровочном стенде с источником гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  с использованием блока-компаратора

Таблица 1 – Калибровочные коэффициенты для блока-компаратора БКМГ-АТ1102 при измерении МАЭД гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  в низкофоновой камере и в низкофоновой лаборатории SPLBRL

Действительное значение МАЭД, нЗв/ч	Калибровочный коэффициент (низкофоновая камера)	Действительное значение МАЭД, нЗв/ч	Калибровочный коэффициент (лаборатория SPLBRL)
33,6	1,073	28,4	1,071
55,4	1,079	47,8	1,072
78,2	1,076	77,2	1,075

Полученные расчетным путем значения радиационного фона близки к измеренным в тех же условиях значениям радиационного фона:  $2,047 \pm 0,016$  нГр/ч против  $2,52 \pm 0,31$  нГр/ч.

Результаты экстраполяции показаний мощности кермы в воздухе блока-компаратора, создаваемые источником гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  на бесконечное расстояние «источник-детектор» на Заславском водохранилище, в низкофоновой камере и в лаборатории SPLBRL представлены на рисунке 8. Измеренные значения мощности кермы в воздухе и вычисленные с помощью линейной аппроксимации хорошо согласуются между собой, что подтверждается коэффициентом корреляции  $r$  более 0,99 (при  $P = 0,95$ ).



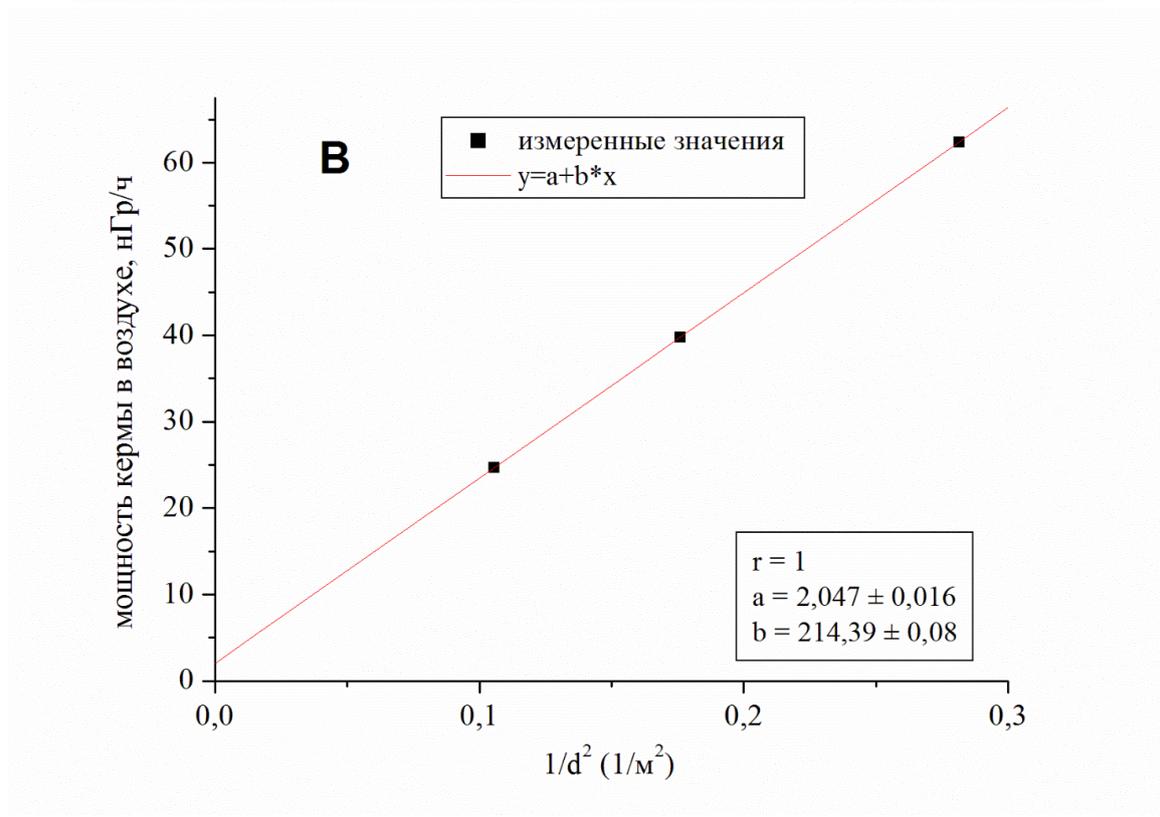
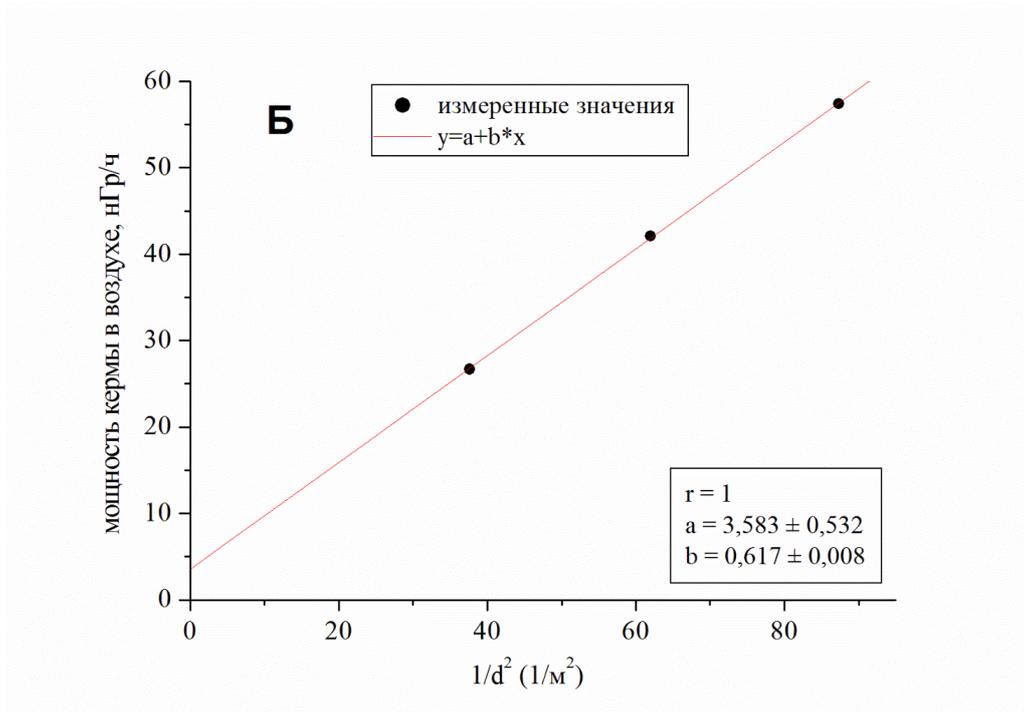


Рисунок 8. Результаты экстраполяции показаний мощности кермы в воздухе, создаваемой источником гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$  на бесконечное расстояние «источник-детектор» на Заславском водохранилище (А), в низкофоновой камере (Б) и в лаборатории SPLBRL (В) полученные с использованием блока-компаратора БКМГ-АТ1102

После проведения калибровки было измерено значение собственного фона детектора из состава блока-компаратора в лаборатории за свинцовым защитным экраном без источника излучения. В таком случае влияние излучения естественных радионуклидов окружающей породы и космической составляющей радиационного фона не существенно. После определения значения собственного фона детектора, основной вклад в который дает присутствие  $^{40}\text{K}$  в стекле ФЭУ, была рассчитана чувствительность детектора к космической составляющей фонового излучения с учетом результатов измерения радиационного фона на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере (таблица 2).

Таблица 2 – Результаты расчетов и измерений радиационного фона в различных условиях с целью определения (оценки вклада) компонент радиационного фона для блока-компаратора БКМГ-АТ1102

Значения радиационного фона, полученные путем экстраполяции измерений мощности кермы в воздухе в низкофоновой лаборатории ( $1/d^2 \rightarrow 0$ ), нГр/ч	Измерения радиационного фона			
	<b>в низкофоновой лаборатории</b> (собственный фон детектора и компонента окружающей среды), нГр/ч	<b>в низкофоновой лаборатории за защитой</b> (собственный фон детектора), нГр/ч	<b>на Заславском водохранилище</b> (собственный фон детектора и космическая компонента), нГр/ч	<b>в низкофоновой камере</b> (собственный фон детектора и космическая компонента), нГр/ч
2,05 ± 0,02	2,52 ± 0,12	1,36 ± 0,11	5,15 ± 0,69	3,64 ± 0,35

Полученные данные для определения собственного фона и чувствительности детектора к космической составляющей фонового излучения хорошо согласуются с данными из литературных источников для данного типа детекторов [9] и будут учитываться при проведении низкофоновых измерений.

По результатам калибровки блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в низкофоновой лаборатории получены свидетельства о калибровке, данные из которого используются для калибровки полей фотонного излучения по мощности дозы, создаваемых с использованием источника гамма-излучения с радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$  в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ» для калибровки высокочувствительных дозиметров радиационной защиты по мощности дозы.

## Заключение

Апробирован метод калибровки дозиметров радиационной защиты по мощности дозы в низкоинтенсивных полях фотонного излучения для задач радиационного мониторинга согласно рекомендациям международных технических стандартов.

Для решения данной задачи применяется высокочувствительный сцинтилляционный блок-компаратор БКМГ-АТ1102, для которого были определены собственный фон и чувствительность к космической компоненте фонового излучения, а также выполнена калибровка в низкоинтенсивных полях фотонного излучения в лаборатории SPLBRL.

Проведение измерений мощности дозы от источника гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ , и оценка радиационного фона в низкофоновой лаборатории в шахте, на Заславском водохранилище и в низкофоновой камере в УП «АТОМТЕХ», позволяет использовать низкофоновую камеру для калибровки по мощности дозы низкоинтенсивные поля фотонного излучения.

Применение разработанной методики аттестации низкоинтенсивных полей фотонного излучения по мощности дозы методом компаратора, результаты калибровки блока-компаратора в диапазоне 0,03 - 0,1 мкЗв/ч и следование рекомендациям МЭК 61017:2016 и МЭК 60846-1:2009 дают основания для использования блока-компаратора для метрологического обеспечения калибровки высокочувствительных дозиметров в полях низкоинтенсивного фотонного излучения.

## Литература

- 1 ГОСТ Р 8.804-2012. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
- 2 IEC 61017:2016. Radiation protection instrumentation - Transportable, mobile or installed equipment to measure photon radiation for environmental monitoring. – IEC, 2016. – 86 p.
- 3 IEC 60846-1:2009. Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors. – IEC, 2009. – 116 p.

- 4 *Фоминых, В.И.* Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора «спектр-доза» / В.И. Фоминых, Г.И. Шульгович, В.А. Кожемякин // Метрология. - № 10, 1983 г. – С. 32 - 39
- 5 Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomtex.com/sites/default/files/udg-at110.pdf>. – Дата доступа: 04.07.2017
- 6 *Лукашевич, Р.В.* Сцинтилляционные блоки-компараторы для измерений мощности кермы в воздухе в диапазоне от 0,03 нГр/с до 50 нГр/с / Р. В. Лукашевич, В. Д. Гузов, В. А. Кожемякин, А. В. Оборин // Метрология и приборостроение. - № 1, 2017. – С. 33 - 37
- 7 *Margineanu, R.* The Slanic-Prahova (ROMANIA) underground low-background radiation laboratory / R. Margineanu, C. Simion, S. Bercea, O.G. Dului, D. Gheorghiu, A. Stochioiu, M. Matei // Applied Radiation and Isotopes. - № 66, 2008. – P. 1501– 1506
- 8 *Dombrowski, H.* Traceability of the PTB low-dose rate photon calibration facility / H. Dombrowski, S. Neumaier // Radiation Protection Dosimetry. - № 140, 2010. – P. 223-233
- 9 *Pensko, J.* Absolute method of the gamma-ray background determination by means of NaI(Tl) scintillation counter / J. Pensko // Nucleonika. - № 12 (4), 1967. – P. 319 - 330

## ФОРСАЙТ БУДУЩИХ ПОТРЕБНОСТЕЙ В МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПАХ

Сухов В.Ю.<sup>1</sup>, Кириченко П.Ю.,<sup>1</sup> Марин А.И.<sup>1</sup>, Поспелов В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Военно-Медицинская академия, С.-Петербург,

<sup>2</sup> ГБ №31, С.-Петербург

[soukhov@mail.ru](mailto:soukhov@mail.ru)

### **Тренд**

Благодаря захватывающим последним клиническим результатам новых методов лечения и диагностики в ядерной медицине будущий спрос на радиофармацевтические препараты, вероятно, изменится как по количеству, так и по типам изотопов. Таким образом, для разработки методов и обеспечения метрологического, калибровочного и радиометрического сопровождения необходимо знать о текущих и будущих требованиях к изотопу.

### **Исследования и разработки**

За последние несколько лет был проведен ряд исследований, направленных на прогнозирование потенциального рынка перспективных новых медицинских изотопов для лечения рака, контроля боли, брахитерапии, инкапсулированных имплантатов и более точных диагностических применений. Эти исследования не обязательно согласуются друг с другом в отношении потенциального спроса на изотопы для ядерной медицины.

### **Спектр изотопов**

По возможности желательно знать спектр изотопов и определить требуемые количества. Какие конкурирующие диагностические и терапевтические методы повлияют на будущее ядерной медицины? Какие и как внешние соображения, такие как регулирование и утилизация отходов, будут влиять на ядерную медицину? Будут ли эти вопросы влиять на выбор изотопов, которые будут использоваться в ядерной медицине? Будут ли они ограничивать использование ядерной медицины и стимулировать развитие и использование не радиоизотопных технологий?

### **Триединство задач и решений**

На сегодняшний день существует три списка изотопов:

Первый список содержит  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{186}\text{Re}$ . Эти изотопы имеют доказанную клиническую эффективность, а также уже установленную логистику производства и доставки.

Второй список состоит из  $^{18}\text{F}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ . Эти изотопы уже широко используются, но также постоянно разрабатываются новые методологии их использования.

Третий список – это исследовательские материалы, которые являются многообещающими, как диагностические и терапевтические средства, но только еще изучаются. Список три включает в себя:  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{62}\text{Zn}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{153}\text{Gd}$ ,  $^{168}\text{Ho}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{211}\text{At}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{213}\text{Bi}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ .

### 1/3 задачи и решения

Первый список (основной):  $^{90}\text{Y}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{111}\text{In}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{186}\text{Re}$

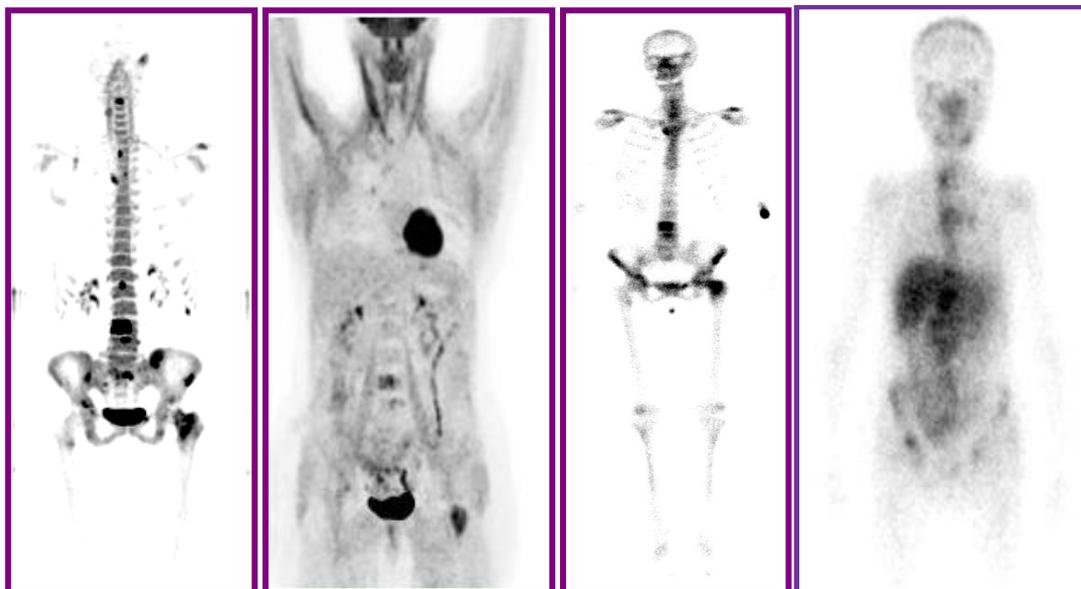


Рисунок 1. Примеры использования радиофармпрепаратов на основе изотопов из 1 списка.

### 2/3 задачи и решения

Второй список  $^{18}\text{F}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{81\text{m}}\text{Kr}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{103}\text{Pd}$ ,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{Xe}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{153}\text{Sm}$ .

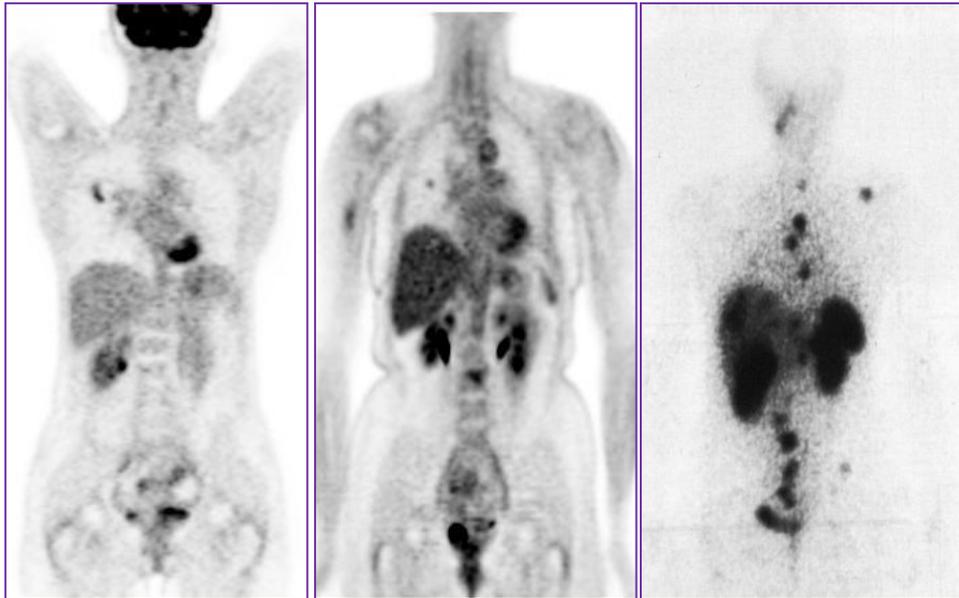


Рисунок 2. Примеры использования радиофармпрепаратов на основе изотопов из 2 списка/

### 3/3 развитие

Третий список –  $^{47}\text{Sc}$ ,  $^{62}\text{Zn}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{67}\text{Cu}$ ,  $^{68}\text{Ge}$ ,  $^{153}\text{Gd}$ ,  $^{168}\text{Ho}$ ,  $^{177}\text{Lu}$ ,  $^{188}\text{Re}$ ,  $^{211}\text{At}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{213}\text{Bi}$ ,  $^{223}\text{Ra}$ .

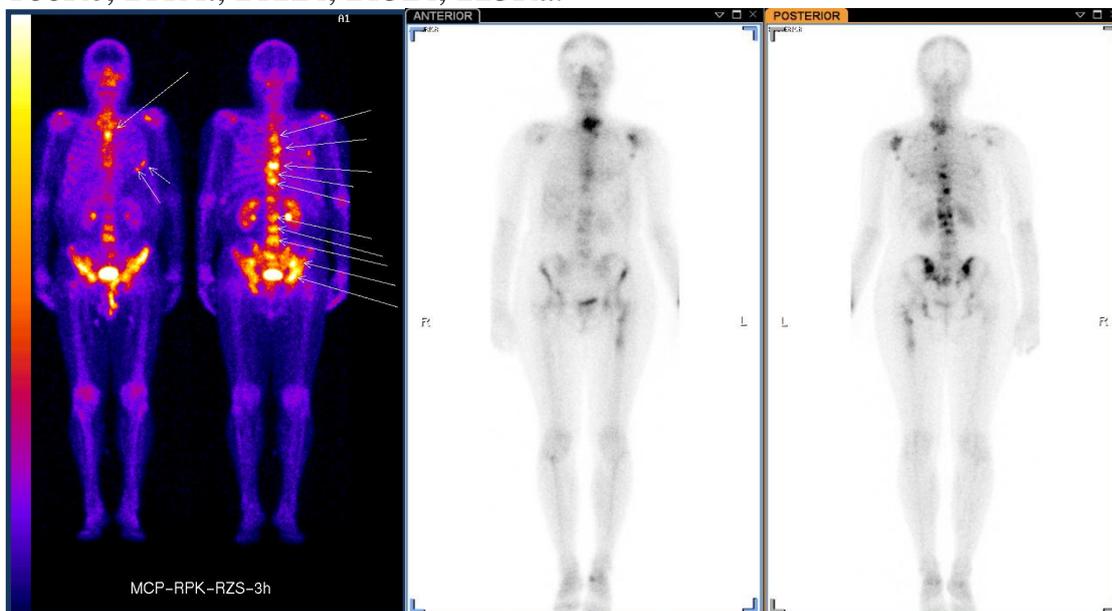


Рисунок 3. Примеры использования радиофармпрепаратов на основе изотопов из 3 списка:

### Востребованность

Все эти изотопы имеют конкретные клинические преимущества в следующих основных областях: диагностика кардиологической и сосудистой патологии, дифференциальное выявление инфекционных заболеваний, выявление и дифференциация злокачественных от

доброкачественных заболеваний и дифференциального диагноза различных психических расстройств и др.

Не менее важна возможность разработки лечения рака соединениями для доставки цитотоксических количеств излучения in-situ. Уже получили развитие и получены впечатляющие результаты моноклональных антител и целевых пептидов к рецепторам соматостатина в лечении лимфом и нейроэндокринных опухолей, а также радионуклидная терапия (РНТ), кратковременная лучевая брахитерапия, целенаправленная или таргетная альфа-терапии (ТАТ) и т.п.

### **Реализация**

Исходя из полученной информации о спектрах излучения, физико-химических свойствах изотопов и биологическом поведении меченных ими препаратов, следует использовать весь накопленный опыт, задействовать уже существующий парк дозиметрического оборудования во вновь разработанных методиках, конструировать новые образцы радиометрического оборудования под появляющиеся нужды.

### **Литература**

1. Radioisotopes in Medicine | Nuclear Medicine. /*World Nuclear Association*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://www.world-nuclear.org/info/Non-Power-Nuclear-Applications/Radioisotopes/Radioisotopes-in-Medicine/#.UU1ok1dWif5>>.
2. Fact Sheet: What is PET?./ *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI)*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://interactive.snm.org/index.cfm?PageID=11123>>.
3. Khoo, Anthony. An overview of cobalt radioisotopes in medicine - by Anthony Khoo - Helium./ *Helium - Where Knowledge Rules*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://www.helium.com/items/871828-an-overview-of-cobalt-radioisotopes-in-medicine>>.
4. Radioisotopes for diagnosis and treatment./ *Lawrence Berkeley National Laboratory*. N.p., 2000. Web. 23 Mar. 2013. <<http://www.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/13/2.html>>.
5. Radioisotopes: What Are They and How Are They Made?./ *The Office of Health, Safety and Security - Home*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <[http://hss.energy.gov/HealthSafety/ohre/roadmap/achre/intro\\_9\\_4.html](http://hss.energy.gov/HealthSafety/ohre/roadmap/achre/intro_9_4.html)>.
6. What is Nuclear Medicine./ *Society of Nuclear Medicine and Molecular Imaging (SNMMI)*. N.p., n.d. Web. 23 Mar. 2013. <<http://snm.org/index.cfm?PageID=3106>>.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ДОЗИМЕТРИИ В РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЕ

И.Г. Тарутин

*РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова  
Минск, Беларусь*

[itarutin@tut.by](mailto:itarutin@tut.by)

### **Введение**

Что такое радиационная медицина? Под радиационной медициной понимается та часть медицины вообще, которая использует для диагностики и лечения пациентов радиоактивные вещества и генераторы ионизирующего излучения. Радиационная медицина включает в себя:

- диагностическую радиологию, в том числе интервенционную радиологию;
- ядерную медицину;
- лучевую терапию.

Обязательным компонентом радиационной медицины является определение поглощенных доз, получаемых пациентами, как при диагностическом, так и при терапевтическом облучении. Именно поэтому вся радиационная медицина находится под жестким контролем регулирующих органов, к которым относятся Госстандарт и Госатомнадзор. Именно эти органы выдают радиологическим клиникам лицензии на применение радиоактивных веществ и ионизирующих излучений в диагностике и терапии, требуют применения только зарегистрированных в стране дозиметрических приборов и устройств, а также проведения их регулярной поверки в государственных метрологических лабораториях.

Государственной поверке подлежат любые приборы и устройства, применяемые для измерения поглощенной дозы, мощности поглощенной дозы, распределений дозы и мощности поглощенной дозы в любых облучаемых объектах, в том числе и в пациентах.

В настоящее время в радиационной медицине применяются десятки различных дозиметрических приборов, сотни измерительных детекторов и в диагностике и в лечении. Все они подлежат метрологической аттестации, своевременность и регулярность которой жестко контролируется регулирующими органами.

Где пользователи могут аттестовать все эти приборы и детекторы?

Здесь очень сильно возрастает роль метрологических лабораторий второго разряда, которые должны взять на себя всю эту аттестацию.

Какими образцовыми приборами эти лаборатории должны владеть? Всеми типами приборов, которые они должны поверять.

Понятно, что расширение номенклатуры аттестационных мероприятий потребует существенного возрастания финансовых средств, как у SSDL, так и в радиологических клиниках. Смогут ли они найти деньги на регулярную поверку всего своего парка дозиметрических систем, приборов и устройств?

### **Как же осуществляется метрологическая аттестация или поверка всего этого оборудования?**

Метрологическая служба Российской Федерации имеет две лаборатории, в Санкт-Петербурге и Москве, которые держат государственные эталоны поглощенной дозы, кермы, активности. В международной терминологии они называются лабораториями первого разряда (PSDL). Эти лаборатории передают единицы эталонных величин лабораториям второго разряда (SSDL), которые потом поверяют рабочие приборы и устройства учреждений-пользователей.

В остальных странах СНГ отсутствуют лаборатории первого разряда и работают только лаборатории второго разряда. Такая ситуация существует и в Республике Беларусь. Наша SSDL разделена на две части, одна из которых принадлежит Государственному институту метрологии БелГИМ, а вторая расположена в РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова. Первая занимается поверками дозиметров для радиационной безопасности и защиты, а вторая для поверки дозиметрических приборов, применяемых в радиационной медицине.

Лаборатория метрологии второго разряда, расположенная на территории нашего Центра онкологии, аттестовывает свои образцовые приборы и радионуклидные источники в Российских лабораториях первого разряда. Что же мы получаем оттуда для распространения в Беларуси? Приведем в таблице 1 данные последних аттестаций.

Таблица 1 – Данные 2016-2017 гг. по аттестации белорусских приборов в PSDL

Прибор	Вид излучения	Погрешность (организация)
Унидоз	Рентген 200 кВ	2% (ВНИИМ)
Унидоз	Рентген 60 кВ	2,5% (ВНИИМ)
Диавольт	Маммография	4% (ВНИИМ)
Унидоз	Кобальт-60	2,5% (ВНИИФТРИ)
Калибратор активности	Цезий-137	6% (ВНИИМ)
СИЧ	Цезий-137	5% (ВНИИМ)
Унидоз	КТ	2,5% (ВНИИМ)
Диавольт	Напряжение	4,5% (ВНИИМ)

## **Анализ полученных данных**

### **Диагностическое облучение**

Основным требованием, предъявляемым к радиационной защите людей при их диагностическом облучении, является максимальное уменьшение эффективной дозы, ими получаемой, при сохранении высокого качества получаемой диагностической информации. Понятно, что уменьшение эффективной дозы, зависит от уменьшения поглощенной дозы.

Наиболее точное определение радиационного выхода рентгеновских аппаратов можно осуществить с помощью дозиметров, измеряющих произведение дозы на площадь (ДАП-дозиметров). Поглощенную дозу, получаемую пациентами можно определять по величине дозы на входе в тело с помощью поверенных ионизационных камер. В радиологии давно существует мнение: чем выше доза, тем точнее её надо определять. Поэтому можно согласиться с тем, что при малых дозах, получаемых пациентами от рентгеновских диагностических исследований, погрешность в 2% при калибровке детекторов в эталонной лаборатории первого разряда можно считать допустимой.

В то же время в диагностической радиологии существует проблема аттестации дозиметров, измеряющих произведение дозы на площадь, встроенных в рентгеновские аппараты. Пока в клиниках для записи в амбулаторные карты пациентов вносятся данные со встроенных ДАП-дозиметров с учетом заводских калибровок. Контролирующие органы требуют от клиник метрологической аттестации этих приборов. Следовательно, SSDL должны иметь свои аттестованные переносные ДАП-дозиметры и работать с ними непосредственно в клиниках. Примером таких дозиметров служат дозиметры под общим названием «Диаментор».

Как может поверять такие дозиметры эталонная лаборатория первого разряда? Легко, если она имеет свои эталонные рентгеновские аппараты.

Ещё одна проблема – аттестация детекторов, используемых для контроля качества компьютерных рентгеновских томографов, решена. Имеются камеры для проверки индексов CTDI и DLP, которые спокойно поверяются на всех метрологических уровнях. Погрешность 2 % здесь допустима. А вот приборы для оценки доз, получаемых пациентами на КТ, пока отсутствуют. Дозы рассчитываются в системах обработки данных самих томографов и погрешности получения результатов превышают 15 %.

### **Ядерная медицина**

Основная проблема, существующая в ядерной медицине, заключается в высокой неопределенности аттестации калибраторов активности. Неопределенность калибровки 6 % для эталона второго

разряда слишком велика. Рабочие приборы, калибруемые в SSDL, приводят к еще более высокой неопределенности, что создает у клинических специалистов неуверенность в получаемых пациентами дозах при диагностических исследованиях. И особо волнует врачей такая неопределенность при проведении радионуклидной терапии с помощью жидких радиофармпрепаратов. К примеру, активность вводимого Йода-131 при облучении рака щитовидной железы может достигать 7-8 ГБк. И ошибки в величине вводимой активности при таких измерениях может составлять 700-800 МБк, что в радионуклидной терапии является недопустимым.

Что касается дозиметрических измерений при проведении диагностических исследований на комбинированных эмиссионных томографах в ядерной медицине, то суммарная эффективная доза может достигать по расчетам 40 мЗв и даже выше, причем рентгеновский томограф создает до 2/3 дозы. Не составляют исключения и ПЭТ/КТ томографы. И проблема точности определения дозы на таких аппаратах более важна, чем в рентгеновской диагностике. Нужно отметить, что дозы при радионуклидной диагностике вычисляются методом Монте-Карло при использовании таблиц MIRD-формализма. Сейчас погрешность определения доз этот метод оценивает в 15 %. Поэтому вопросы более точного определения доз в ядерной медицине еще требуют своего решения, в том числе и улучшения метрологического обеспечения.

### **Лучевая терапия**

Современная лучевая терапия в настоящее время интенсивно переходит на облучение пациентов с помощью медицинских линейных ускорителей электронов. Все ускорители являются изоцентрическими, вращаются вокруг стола с пациентами на максимальный угол 360 градусов. В последних моделях ускорителей можно автоматически изменять скорость вращения штативов в процессе облучения пациентов. Размеры полей облучения могут изменяться от 2,5×2,5 мм до 40×40 см. При этом меняется и конфигурация полей облучения. На выходных устройствах аппаратов устанавливаются многолепестковые коллиматоры, позволяющие создавать поля облучения различных размеров и конфигурации, что позволяет существенно уменьшить объемы облучения нормальных тканей, окружающих опухолевые очаги-мишени. Количество лепестков в разных ускорителях варьирует от 80 до 160 пластин (от 40 до 80 пар). Тень от пластин на уровне изоцентра составляет на разных ускорителях от 2,5 мм до 10 мм. Каждая пластина управляется своим двигателем, и конфигурация и размеры полей могут меняться автоматически в зависимости от направления на облучаемый объект.

На штативах ускорителей размещаются рентгеновские излучатели, предназначенные для точного наведения пучков фотонов на облучаемые

мишени. Они же позволяют контролировать с помощью матричных детекторов неподвижность положения пациентов на лечебном столе в процессе облучения. Для верификации условий облучения применяются матричные детекторы, регистрирующие фотонные поля, прошедшие через облучаемые объекты.

Наиболее сложным в лучевой терапии в настоящее время является дозиметрическое обеспечение качественной работы медицинских линейных ускорителей электронов. Общеизвестной международной рекомендацией является максимальная погрешность доставки поглощенной дозы пациентам, не превышающая 5 % [1]. Отсюда возникает необходимость проводить любые измерения поглощенных доз на ускорителях с погрешностью, не превышающей 3 %.

В РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова в 2014–2015 годах разработаны руководства по контролю качества современных линейных ускорителей электронов для проведения высокотехнологичной прецизионной лучевой терапии в медицинских учреждениях, а также по её дозиметрическому сопровождению [2, 3].

### **Какие дозиметрические измерения нужно проводить на ускорителях электронов?**

1. Калибровка мониторных камер в стандартных условиях при использовании всех энергий электронов и фотонов.
2. Измерения радиационного выхода фотонов и электронов различных энергий, различной конфигурации и размеров полей излучения.
3. Измерения поглощенных доз различными матричными детекторами, в том числе для верификации выработанных планов облучения пациентов.
4. In vivo измерения доз, получаемых пациентами.
5. Дозиметрические приборы для проведения быстрых измерений полей фотонов в процессе контроля качества работы ускорителей.

### **Дозиметры и камеры**

Результаты поверок в PSDL дозиметров, применяемых на ускорителях электронов, на пучках Co-60:

- камера Фармера 0,6 см<sup>3</sup>. Основная камера для калибровки мониторных камер ускорителей. Погрешность калибровки в PSDL 2,5 %;
- камера Roos плоско-параллельная 0,35 см<sup>3</sup>. Применяется для калибровки мониторных камер на пучках электронов. Погрешность 2,5 %;

- камера Markus плоско-параллельная 0,055 см<sup>3</sup>. Применяется для калибровки мониторных камер на пучках электронов. Погрешность 2,5 %.

Передачу из PSDL в SSDL калибровочных коэффициентов с погрешностью 2 и более процентов следует считать неудовлетворительной. Применение высокотехнологичной лучевой терапии на ускорителях требует снижения указанных величин, по крайней мере, вдвое.

### **Калибровка мониторных камер в стандартных условиях**

Калибровка мониторных камер линейных ускорителей должна проводиться еженедельно, поскольку они имеют особенность плавания характеристик. При этом отклонение величины мониторной единицы от 1 сГр не должно превышать 1 %. Такая калибровка должна проводиться на всех энергиях фотонов и электронов. Калибровки проводятся медицинскими физиками учреждения.

Как в данном случае относиться к требованию инспектирующих организаций о метрологической аттестации мониторных камер? Кто её должен проводить? Какими приборами? На каких фантомах? Сколько раз в году? Один раз в году? Два раза? На фоне регулярных еженедельных измерений цены мониторной единицы физиками учреждения 50 раз в году однократные измерения теряют свою аттестационную направленность и превращаются в проверку квалификации обслуживающего персонала: медицинских физиков и инженеров по обслуживанию. А может быть, нужно проводить сравнительные измерения совместно с пользователями? Возникает вопрос, имеют ли право SSDL проводить такую проверку? Поставленные вопросы требуют обсуждения и выработки соответствующих рекомендаций.

### **Измерения дозовых характеристик полей облучения фотонов и электронов различных энергий, конфигурации и размеров полей излучения**

Как правило, на этапе приемки ускорителя в клиническую эксплуатацию необходимо провести измерения дозовых характеристик полей облучения при разных энергиях, размерах полей и т.д. Измерения проводятся либо в водных, либо в твердотельных фантомах. Детекторы для этих измерений очень редко проходят аттестацию в SSDL, и тем более в PSDL.

Эти детекторы имеют малые полости воздушного объема чувствительной зоны (например, Pin Point), либо не имеют его вовсе (например, алмазные или диодные детекторы). Калибруются все они медицинскими физиками учреждений по своим рабочим дозиметрам, откалиброванным в SSDL. С помощью этих детекторов проводятся

относительные дозиметрические измерения с погрешностями на уровне 1-1.5 %.

Нужно ли эти детекторы и их измерительные системы подвергать метрологической аттестации? Вероятно да. На каких пучках?

### **Измерения поглощенных доз различными матричными детекторами**

Матричные детекторы все интенсивнее внедряются в технологический процесс лучевой терапии на линейных ускорителях. Кроме их применения в порталных и рентгеновских системах, установленных непосредственно на ускорителях, различные матричные системы применяются для верификации рассчитанных планов высокотехнологичного облучения пациентов. Используются верификационные матрицы вместе со специальными фантомами. При этом можно проверять плоскостные и объемные дозовые распределения планов IMRT (радиотерапия с модулированной интенсивностью облучения), VMAT (динамическая терапия с модулированной объемной интенсивностью излучения), 4D – излучение, синхронизированное с дыханием пациента, и др. Вопрос об аттестации таких матричных систем пока остается абсолютно неясным.

### **Дозиметрические приборы для проведения быстрых измерений полей фотонов в процессе контроля качества работы ускорителей**

В контроле качества работы ускорителей применяются дозиметрические матричные устройства с небольшим числом детекторов. Они применяются для быстрой ежедневной проверки геометрических характеристик пучков фотонов и электронов, а также относительного распределения дозы по точкам их расположения. Таким образом, проверяются совпадение световых и радиационных границ полей излучения, а также симметрия в профильных распределениях. Осуществляются эти проверки медицинскими физиками учреждения. Нужна ли этим приборам, общее название которых “Quick Check”, какая-либо метрологическая аттестация?

### **In vivo измерения доз, получаемых пациентами**

In vivo измерения доз, получаемых пациентами, представляют собой прямую верификацию реализации запланированных программ облучения. В некоторых точках тела, как правило, на коже, системами планирования рассчитывается значение поглощенной дозы. Именно в этих точках размещаются детекторы, измеряющие отпущенную дозу. In vivo детекторы могут быть разделены на две категории:

- детекторы, получающие результат в реальном времени;
- детекторы, требующие для получения результатов дополнительной обработки.

К первой категории относятся диодные детекторы, устройства портальной регистрации, полевые транзисторы на МОП-структурах.

Ко второй категории относятся различные люминесцентные детекторы.

Оценка полученных результатов проводится с помощью оценки так называемого гамма-индекса, предусматривающего допуски на отклонение точек размещения детекторов не более 3 мм и отклонение полученной дозы от заданной не более 3 %. Отсюда можно сделать вывод о допустимых погрешностях при калибровке *in vivo* детекторов на применяемых в клиниках видах и энергиях излучения.

### **Ускорители тяжелых заряженных частиц**

Представляет также большой интерес аттестация различных дозиметрических систем и устройств, применяемых на ускорителях протонов, а также тяжелых ионов.

Пока калибровки этих систем проводятся на пучках кобальта-60 по методикам, предложенным в Коде практики МАГАТЭ № 398 [4]. Но это касается калибровок мониторинговых камер, которые там используются. Что касается различных матричных и других устройств, используемых в контроле качества этих ускорителей, то это дело будущего.

### **Заключение**

В настоящее время аттестация клинических дозиметров проводится в PSDL и, соответственно в SSDL, проводится на пучках  $^{60}\text{Co}$ . В клиниках их применение на ускорителях осуществляется самими пользователями по методикам, приведенным в [4]. Но в дальнейшем аттестация всех измерительных систем и устройств, применяемых на ускорителях электронов, вероятно, потребует создания эталонных ускорителей в лабораториях первого разряда. Такая работа сейчас проводится в развитых странах мира, и особенно в тех, где дистанционная гамма-терапия уже не применяется.

Здесь возникает целый ряд проблем, связанных с конструкцией выходных устройств ускорителей, созданием эталонных детекторных систем и, главным образом, передачей соответствующих коэффициентов в SSDL, а оттуда в клиники, применяющие ускорители в лучевой терапии. Не исключено, что аттестация дозиметрических систем, встроенных в аппараты, должна будут проводиться специалистами SSDL непосредственно в клиниках на этих установках.

Этот технологический процесс ещё требует своих организационных и методических решений. Но решение этих проблем уже назрело. И, в первую очередь, оно связано с требованиями инспекционных органов, контролирующих качество работы радиотерапевтической техники в клиниках.

Конечно, в наших странах работает ещё много гамма-терапевтических аппаратов для дистанционного облучения, поэтому эталоны кобальта также должны сохраняться, однако, с более высокой точностью измерений, по сравнению с тем, что мы имеем сейчас.

Создание новых эталонов для аттестации увеличившегося парка дозиметрических приборов в медицинских учреждениях потребует значительного увеличения расходов на их приобретение и последующее содержание. Естественно, увеличится стоимость аттестации образцовых приборов для лабораторий второго разряда. Они, в свою очередь, повысят стоимость поверок дозиметрических приборов и устройств, применяемых в клинических учреждениях.

Такая ситуация может вызвать протесты со стороны клиник, особенно, если их возглавляют хирурги или химиотерапевты. Но здесь, в решении этих затруднений, помогут контролирующие органы, которые и являются инициаторами усиления метрологического контроля оборудования для радиационной медицины. Под угрозами лишения лицензий, закрытия эксплуатации аппаратов, клиники будут вынуждены платить за предоставляемые метрологические услуги. В то же время увеличение точности аттестации дозиметрических приборов неминуемо приведет к повышению эффективности лучевого лечения онкологических пациентов.

## Литература

1. Determination of Absorbed Dose in a Patient irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures/Report ICRU-24 of Intern. Comiss. on Radiation Units and Measurements. – Bethesda, MD: ICRU, 1976.–76p.
2. Тарутин И.Г. Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии/И.Г. Тарутин, Е.В. Титович//Беларуская навука, Мн. 2014.-173с.
3. Высокотехнологичная лучевая терапия/Сб. нормативных документов. Мн. Беларуская навука, 2016. С.44-142.
4. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде/ Серия технических докладов №398. МАГАТЭ, Вена, 2004.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Генералова В.В., Громов А.А., Гурский М.Н., Жанжора А.П.,  
Емельяненко И.А., Тенишев В.П.

ФГУП «ВНИИФТРИ»

[tenishev@vniiftri.ru](mailto:tenishev@vniiftri.ru)

Единство измерений МПД и ПД интенсивных излучений в радиационных технологиях в России обеспечивается Государственным (Национальным) первичным специальным эталоном единицы мощности поглощенной дозы интенсивного фотонного ( $\text{Co}^{60}$ ,  $\text{Cs}^{137}$ ), электронного и бета-излучений ( $\text{Sr}^{90} + \text{Y}^{90}$ ) ГЭТ 209-2014 (ФГУП «ВНИИФТРИ»).

Единица МПД (Грей в секунду или Дж/кг сек), воспроизводится калориметрическим методом, основанном на измерении мощности тепловыделения в поглотителе калориметра (с поглотителями из графита или полистирола) в результате поглощения энергии ионизирующего излучения.

### Основные характеристики эталона ГЭТ 209-2014

Характеристики	Фотонное излучение	Ускоритель электронов	Бета-излучение
Энергии излучения, МэВ	0,66 – $\text{Cs}^{137}$ 1,25 – $\text{Co}^{60}$	от 3 до 10	до 2,3 (макс) $\text{Y-90} + \text{Sr-90}$
Мощности поглощенной дозы, Гр/сек	от 0,3 до $10^3$	от $10^2$ до $2 \cdot 10^5$	от 0,3 до $10^2$
СКО	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
НСП	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Суммарная расширенная неопределенность, $K=2$	$7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$

Прослеживаемость результатов измерений к национальному эталону обеспечивается пленочными и твердосплавными дозиметрами (стандартные образцы). Разработаны методики калибровки и градуировки этих средств на национальном эталоне ГЭТ 209-2014, методики измерения и передачи единицы ПД интенсивных потоков ионизирующих излучений. Для контроля процесса радиационной обработки изделий разработан химический пленочный цветовой индикатор поглощенной дозы ЦВИД.

Тип дозиметра (стандартного образца)	Сертификат утверждения	Диапазон измерения ПД
СО ПД(Ф)-5/50	СО №1688	5 – 50 кГр
СО ПД(Ф)Р-30/200	СО №1687	30 – 300 кГр
СО ПД(Ф)Р-5/50	СО №1560	5 – 50 кГр
СО ПД(Э)-1/10	СО №3532	1 – 10 кГр
СО ПД(ДТС)-0,05/10	СО №1048	50 Гр – 10 кГр
Цветовой индикатор ПД		1-50 кГр

Пленочные и стеклянные дозиметрические системы (стандартные образцы) ФГУП «ВНИИФТРИ» являются уникальными. В настоящее время эти СО используются для аттестации радиационно-технологических процессов в установках с электронными ускорителями и радионуклидными источниками в соответствии с существующими нормативными требованиями и технологий облучения (ГОСТы, ISO, МИ т.п.) при радиационной обработке медицинской продукции, биодобавок, растительного лекарственного сырья и продуктов питания, радиационной модификации свойств полимеров, исследование изделий электронной техники под воздействием радиационного воздействия и в микробиологии т.п. Диапазон чувствительности и линейные размеры данных СО позволяют их использовать при дозиметрических измерениях, при испытаниях различных объектов на радиационную стойкость, при воздействии специальных факторов.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЦИНТИЛЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ЛИТИЕВОГО СТЕКЛА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Масляев П.Ф., Федоров С.Г.

*ФГУП «ВНИИФТРИ»*

Использование сцинтиллятора на основе литиевых стекол разных диаметров и толщин с набором шаровых замедлителей диаметром от 70 мм до 300 мм для регистрации нейтронного излучения с энергией от 0,4 эВ до 15 МэВ.

## **Введение**

Для большинства изотопов интенсивность нейтронного излучения чрезвычайно низка по сравнению с интенсивностью гамма-излучения. Но есть изотопы, для которых интенсивность нейтронного излучения достаточно высока для образования легко измеримого сигнала.

Существует два основных типа взаимодействия нейтронов с веществом. Во-первых, может иметь место рассеяние нейтрона на ядре с передачей последнему части кинетической энергии, ядро отдачи ионизирует вещество вокруг точки взаимодействия. Данный механизм эффективен лишь при взаимодействии нейтронов с легкими ядрами. Для практического использования в детекторах достаточно легкими являются только ядра водорода и гелия. Во-вторых, нейтрон может вызвать ядерную реакцию. Продукты этих реакций, такие как протоны, альфа-частицы, гамма-кванты и осколки деления, могут регистрироваться детектором. Условием протекания некоторых реакций является наличие минимальной энергии нейтронов (энергетического порога), но ряд реакций могут происходить и на тепловых нейтронах. Детекторы, регистрирующие тепловые нейтроны, как правило, окружены материалом-замедлителем нейтронов, что позволяет добиться достаточной эффективности регистрации нейтронов различной энергии [1].

Сцинтилляторы на основе лития применяются для нейтронной спектрометрии, нейтронной радиографии, в изучении нефтяных скважин, а также при регистрации альфа, бета и гамма излучения в жестких условиях. Однако наиболее широко сцинтилляторы применяются при регистрации нейтронов благодаря обогащению состава литием  ${}^6\text{Li}$ .

Литий дает многочисленные химические соединения, часть которых используется в детектировании нейтронов. Йодистый литий  $\text{LiI}$  идет на приготовление монокристаллов для сцинтилляционных счетчиков. Из окиси лития  $\text{Li}_2\text{O}$  изготавливают сцинтиллирующие стекла (литиевые стекла).

Изотоп лития  ${}^6\text{Li}$  характеризуется большим сечением  $(n,\alpha)$  – реакции на медленных нейтронах. Реакция  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$  относится к экзотермическим

реакциям, в которой освобождается около 4,8 МэВ энергии. В результате реакции  $\alpha$ -частица и ядро трития разлетаются с кинетическими энергиями  $E_\alpha=2,05$  МэВ и  $E_\gamma=2,75$  МэВ. Сечение (n, $\alpha$ )-реакции на  ${}^6\text{Li}$  для медленных нейтронов описывается законом  $1/v$ . При энергии нейтронов  $E_0 = 0,025$  эВ сечение (n, $\alpha$ )-реакции  $\sigma_0= 945$  барн. Сечение (n, $\alpha$ )-реакции природного лития, содержащего 7,5%  ${}^6\text{Li}$ , составляет всего 71 барн. Поэтому природный литий, как и природный бор, обогащают по изотопу  ${}^6\text{Li}$  до 90 %.

В основе воспроизведения единицы мощности эквивалента дозы нейтронного излучения на государственном первичном эталоне единиц мощности поглощенной дозы и мощности эквивалента дозы нейтронного излучения ГЭТ 117-2010 лежит метод с использованием измерителя мощности эквивалента дозы с набором шаровых замедлителей. В основу метода положен блок детектирования со сменными шаровыми замедлителями различных диаметров и блок обработки сигнала. Блок детектирования состоит из сцинтилляционного детектора тепловых нейтронов  ${}^6\text{LiI}$  (Рисунок 1). Диаметр сцинтиллятора 8 мм, высота 8 мм. Блок обработки сигнала включает в себя высоковольтный источник напряжения, АЦП работающий под управлением программы «ball».



Рисунок 1. Блок детектирования из состава ГЭТ 117-2010.

### Эксперимент

В качестве аналога для воспроизведения единицы мощности эквивалента дозы нейтронного излучения было рассмотрено использование блока детектирования с использованием литиевых стекол. В таблице 1 представлено сравнение основных характеристик двух видов сцинтилляторов.

Таблица 1 – Основные характеристики сцинтилляторов на основе лития.

Характеристика	Йодистый литий LiI(Eu)	Окиси лития Li <sub>2</sub> O
Обогащение <sup>6</sup> Li, %	Не более 90	95
Плотность, г/см <sup>3</sup>	4,06	2,42
Световой выход, %	~15	20
Гигроскопичность	Да	Нет

Принципиальная схема измерительного устройства представлена на рисунке 2.

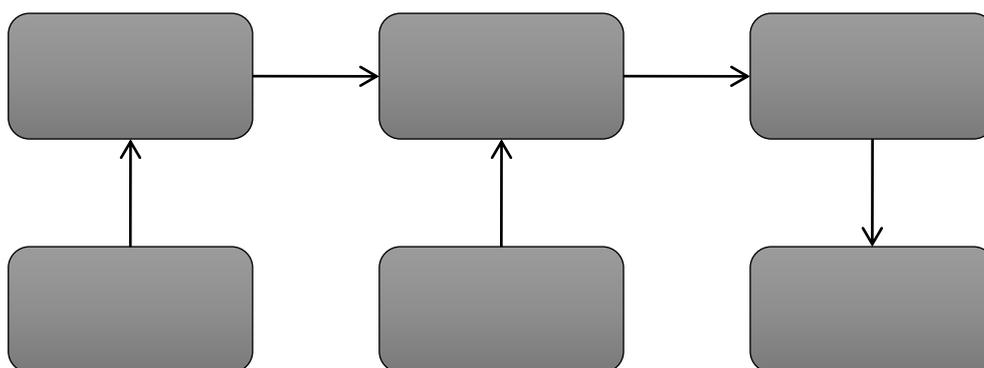


Рисунок 2. Принципиальная схема измерительного устройства.

Световые вспышки регистрируются с помощью фотоумножителя, который соединен со сцинтиллятором посредством световода из оргстекла. Импульсы с фото-умножителя блока детектирования через усилитель поступают на аналогово-амплитудный преобразователь (амплитудный анализатор). Измеритель работает в автоматическом режиме под управлением программы «ball». Измерения проводятся в коллимированном пучке нейтронного излучения последовательно с каждым шаровым замедлителем.

Нормированные аппаратурные спектры, полученные для разных сцинтилляционных детекторов и размеров шаров, показаны на рисунках 3-4.

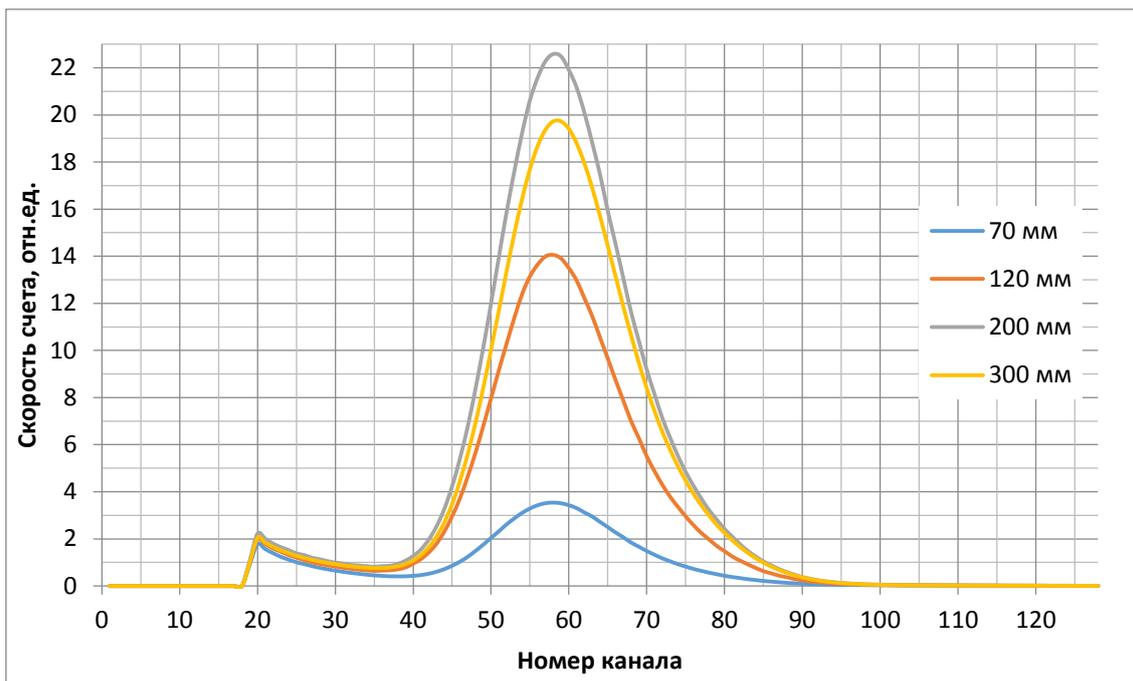


Рисунок 3. Отклик сцинтилляционного детектора из литиевого стекла при использовании шаровых замедлителей различного диаметра.

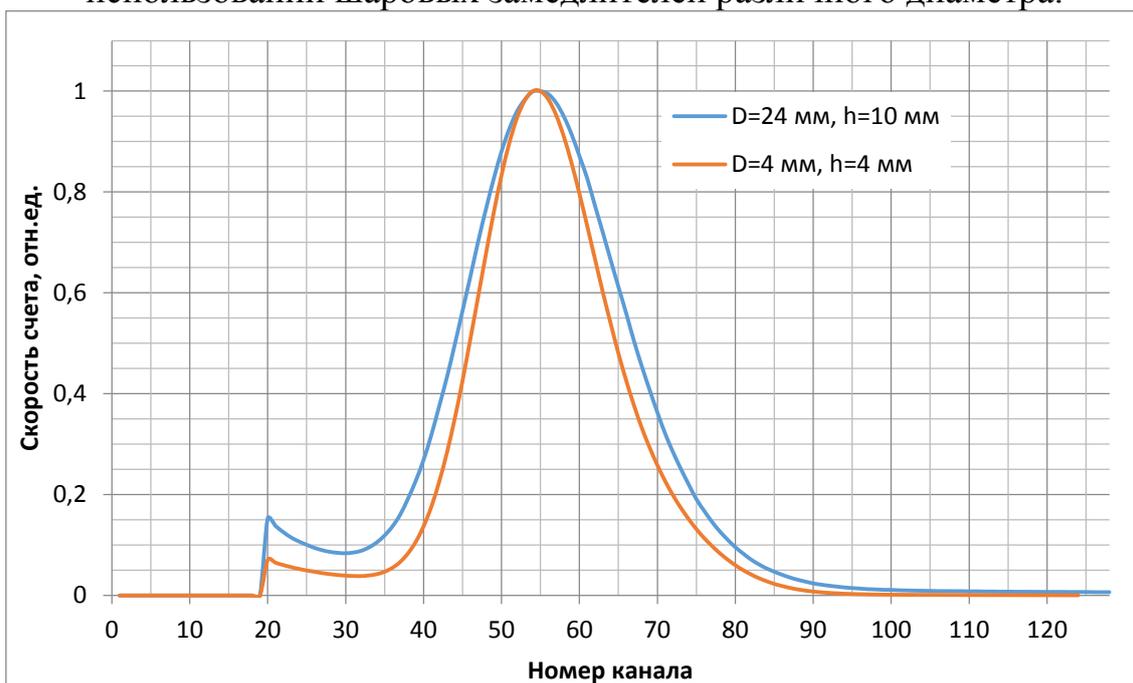


Рисунок 4. Сравнение нормированных аппаратурных спектров от сцинтилляционных детекторов из литиевых стекол разного размера, размещенных в шаровом замедлителе диаметром 300 мм.

Сравнение рисунков 5 и 6 показывает преимущество использования литиевых стекол перед сцинтиллятором из йодистой литий. На рисунке 6 помимо основного пика от тепловых нейтронов соответствующего энергии 4,8 МэВ, присутствует пик от гамма-излучения с энергией 4,4 МэВ

плутоний-бериллиевого нейтронного источника из-за наличия тяжелого изотопа йода, что приводит к дополнительной погрешности, связанной с наличием существенного взаимодействия с гамма-излучением. Также чувствительность к гамма-излучению кристалла  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  будет зависеть от его размеров и ограничивает его использование.

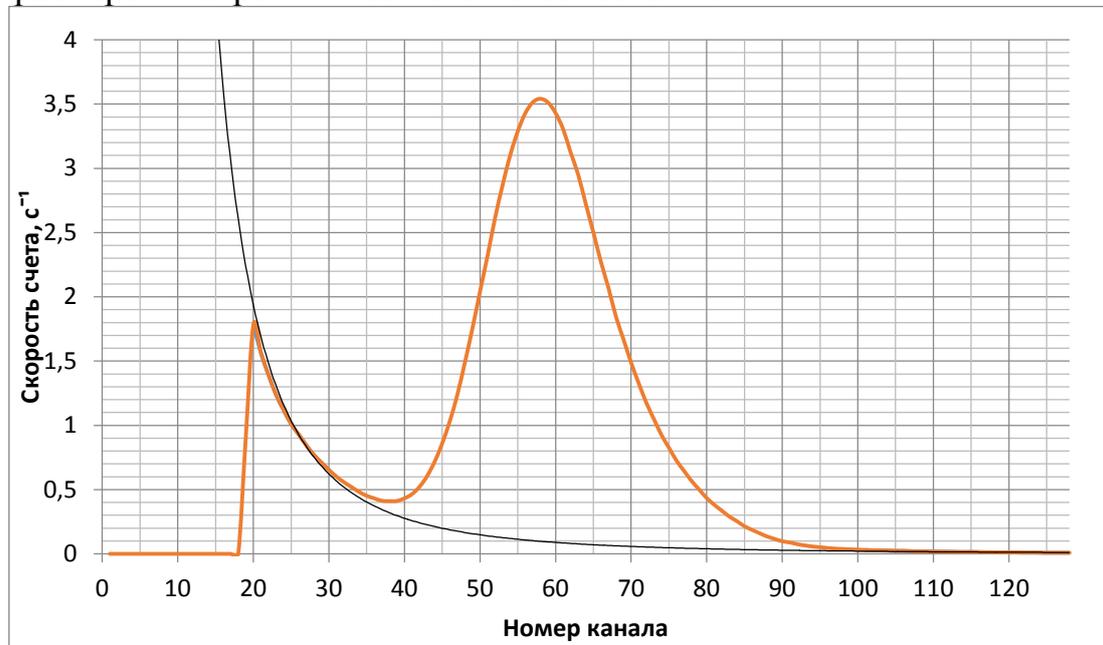


Рисунок 5. Аппаратурный спектр сцинтиляционного детектора из семи литиевых стёкол размещенных в шаровом замедлителе диаметром 70 мм на расстоянии 1 м от PuBe источника, размер стекла: диаметр 4 мм, высота 4 мм. Черная кривая показывает вклад гамма-излучения.

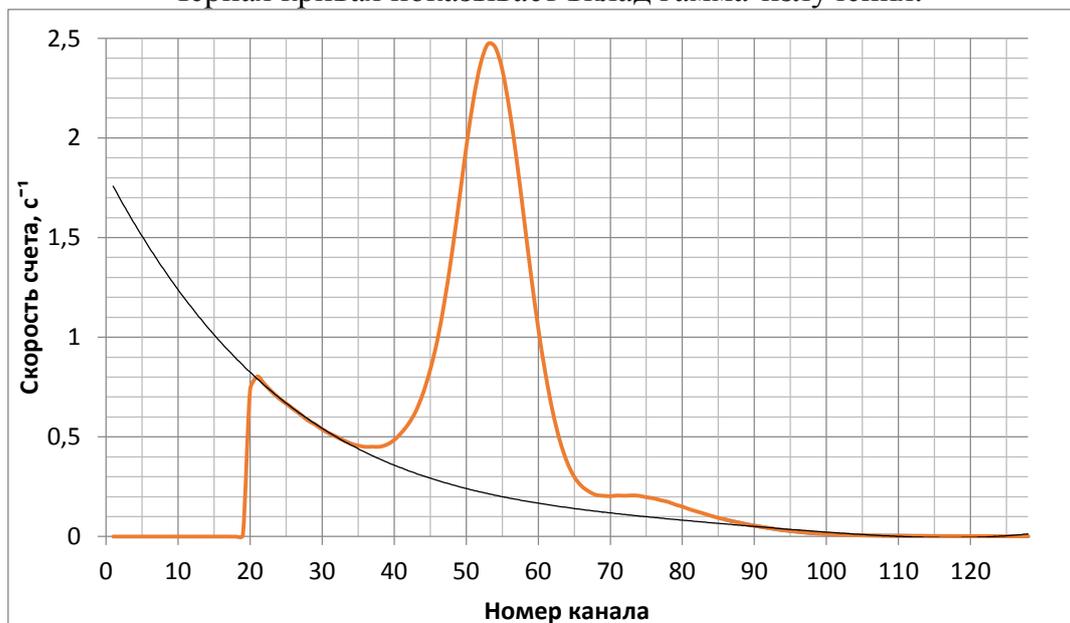


Рисунок 6. Аппаратурный спектр сцинтиляционного детектора  ${}^6\text{LiI}$  размещенного в шаровом замедлителе 70 мм на расстоянии 1 м от PuBe источника, размер детектора: диаметр 8 мм, высота 8 мм. Черная кривая показывает вклад гамма-излучения.

В таблице 2 приведены экспериментальные значения полных откликов сцинтилляционных детекторов  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  и литиевых стёкол ( ${}^6\text{Li}_2\text{O}$ ) с шаровыми замедлителями различных диаметров в поле плутоний-бериллиевого нейтронного источника.

Таблица 2 – Полный отклик детекторов в зависимости от типа и размера детекторов

Тип и размер детектора	Полный отклик детекторов ( $\text{с}^{-1}$ ) в зависимости от диаметра шарового замедлителя и типа детектора			
	70 мм	120 мм	200 мм	300 мм
${}^6\text{LiI}$ , D=8 мм, h=8 мм	49,24	137,40	214,73	181,05
${}^6\text{Li}_2\text{O}$ , D=4 мм, h=4 мм	96,28	315,86	494,66	436,00
${}^6\text{Li}_2\text{O}$ , D=24 мм, h=10 мм	421,03	1052,54	1600,32	1386,72

В таблице 3 приведены экспериментальные значения откликов сцинтилляционных детекторов  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$  и литиевых стёкол ( ${}^6\text{Li}_2\text{O}$ ) от тепловых нейтронов с шаровыми замедлителями различных диаметров в поле плутоний-бериллиевого нейтронного источника. Сравнивая между собой сцинтилляционные детекторы видно, что детекторы на основе литиевых стёкол имеют большую чувствительность к тепловым нейтронам даже при меньшем размере, а также существенно меньшую чувствительность к гамма-излучению.

Таблица 3 – Отклик детекторов от тепловых нейтронов в зависимости от типа и размера детекторов

Тип и размер детектора	Отклик детекторов от тепловых нейтронов ( $\text{с}^{-1}$ ) в зависимости от диаметра шарового замедлителя			
	70 мм	120 мм	200 мм	300 мм
${}^6\text{LiI}$ , D=8 мм, h=8 мм	24,45	100,95	166,70	137,60
${}^6\text{Li}_2\text{O}$ , D=4 мм, h=4 мм	71,44	284,28	462,59	394,46
${}^6\text{Li}_2\text{O}$ , D=24 мм, h=10 мм	275,46	894,45	1421,78	1208,15

В таблице 4 приведены коэффициенты, показывающие отношение отклика от тепловых нейтронов к полному отклику в зависимости от диаметра шарового замедлителя.

Таблица 4 – Коэффициент отношения отклика от тепловых нейтронов к полному отклику в зависимости от типа и размера детекторов

Тип и размер детектора	Коэффициент отношения отклика от тепловых нейтронов к полному отклику в зависимости от диаметра шарового замедлителя			
	70 мм	120 мм	200 мм	300 мм
${}^6\text{LiI}$ , D=8 мм, h=8 мм	0,49	0,73	0,77	0,76
${}^6\text{Li}_2\text{O}$ , D=4 мм, h=4 мм	0,74	0,90	0,93	0,90
${}^6\text{Li}_2\text{O}$ , D=24 мм, h=10 мм	0,65	0,85	0,89	0,87

## Выводы

Рассмотренный в качестве аналога для воспроизведения единицы мощности эквивалента дозы нейтронного излучения блок детектирования с использованием литиевых стекол является хорошей заменой сцинтиллятора  ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ . Стекло обладает большей чувствительностью к тепловым нейтронам. Использование литиевых стёкол не накладывает ограничений на размер детектора, так как практически не чувствительно к гамма-излучению и не содержит примеси тяжелых изотопов йода и других нуклидов, влияющих на дополнительную погрешность при обработке пика от тепловых нейтронов. Эффективность снимаемого сигнала при использовании шарового замедлителя диаметром 70 мм увеличивается в 1,49 и 1,32 раза для литиевых стёкол размером  $D=4$  мм,  $h=4$  мм и  $D=24$  мм,  $h=10$  мм соответственно. Эффективность снимаемого сигнала при использовании шарового замедлителя диаметром 120, 200, 300 мм увеличивается в 1,20 и 1,15 раза для литиевых стёкол размером  $D=4$  мм,  $h=4$  мм и  $D=24$  мм,  $h=10$  мм соответственно.

## Литература

- 1 Детекторы нейтронов. Т.В. Детекторы нейтронов. Т.В. Крейн, М.П. Бейкер, глава 13, стр. 377

## Секция 07 «Новые задачи метрологии 21 века»

Содержание	стр.
Гнедых Д.С., Костромина С.Н. <i>Санкт-Петербургский государственный университет</i> , «Нейрофизиологические методы измерения психических явлений: проблемы и перспективы»	233
И.А. Николаева, <i>Курганский государственный университет</i> «Опыт использования неградуированной графической шкалы в определении оценочного стиля эксперта»	240
И.Ф. Шишкин, <i>ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»</i> «Парадигмы измерений»	247
К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов, Ю.В. Бакшеева, <i>ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения</i> «Прогнозирование состояния систем как актуальная задача метрологии»	261
Соколов Б.В., Бураков В.В, Микони С.В., Юсупов Р.М. <i>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН), Университет ИТМО</i> «Методы и алгоритмы оценивания и управления качеством моделей сложных объектов»	272
Г.Ф. Малыхина, <i>СПб политехнический университет Петра Великого</i> «Нейросетевой подход к измерениям в условиях неполной информации»	290
Л.А. Станкевич, К.М. Сонькин, Н.В. Шемякина, Ж.В. Нагорнова, Ю.Г. Хоменко, Ф.В. Гунделах, А.В. Чевыкалова, <i>СПб университет Петра Великого, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН</i> «Регистрация, преобразование и классификация ЭЭГ-паттернов воображаемых движений в реальном времени для интерфейса мозг-компьютер»	299
М.П. Генри, <i>Университет Оксфорда</i> «Введение в обработку сигналов PRISM»	305
В.С. Фетисов, З.И. Харисова, <i>Уфимский государственный авиационный технический университет</i> «Интеллектуальные измерительные системы для поточных измерений с функцией дообучения в процессе работы»	317

А.А. Калашников, <i>Московский филиал "ЦЕНТРАТОМТЕХЭНЕРГО"</i> <i>АО "АТОМТЕХЭНЕРГО"</i>	327
«Повышение метрологической достоверности многопараметрических измерений, выполняемых гидростатическими уровнемерами»	
В.М. Гуревич, <i>ЗАО «Центрприбор»</i>	338
«Оптимизация характеристик времяпролетных ультразвуковых расходомеров»	
Любимцев В.А., Холодкевич С.В., Дружинин И.И. <i>Санкт- Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербургский государственный университет, ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»</i>	351
«Метрологическое обеспечение биоэлектронных систем диагностики острой токсичности воды»	
С.И. Рембеза, Н.Н. Кошелева, Е.С. Рембеза, Т.В. Свистова, <i>ФГБОУ ВО Воронежский государственный Технический университет, ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет</i>	360
«Электронный нос – мечта или реальность?»	
А. Лекосье, К. Ча-Токи, С. Ричир, <i>LAMPA laboratory, Arts et Métiers Paris Tech Angers</i>	366
«Важность измерения опыта пользователя в 21 веке: вызов инновационных технологий»	
Х.Л.Радев, В.Й.Богоев, В.А.Василев, И.Х.Благов, <i>Технический университет (София, Болгария)</i>	383
«Сравнительный анализ методов отклонения от постоянства оси вращения объектов, осуществляющих ротационные движения»	

## НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПСИХИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Гнедых Д.С., Костромина С.Н.

*Санкт-Петербургский государственный университет*

[d.gnedyh@spbu.ru](mailto:d.gnedyh@spbu.ru)  
[s.kostromina@spbu.ru](mailto:s.kostromina@spbu.ru)

Одна из ключевых методологических задач психологической науки – объективизация изучаемых психологических явлений. Решение этой задачи во многом определяет вектор принадлежности психологии к гуманитарному или естественно-научному знанию. На протяжении последних столетий психология упорно стремилась занять свое место среди естественно-научных дисциплин в том числе, за счет активного внедрения разнообразных математико-статистических программ и методов измерений. Современный же этап развития психологии во многом связан с активным внедрением методов нейровизуализации – электроэнцефалографии, магнитно-резонансной томографии, позитронно-эмиссионной томографии и др. В связи с чем, как никогда актуальным становится высказывание И.П. Павлова: «Я убежден, что приближается важный этап человеческой мысли, когда физиологическое и психологическое, объективное и субъективное действительно сольются, когда фактически разрешится или отпадет естественным путем мучительное противоречие или противопоставление моего сознания моему телу» (Павлов, XV Международный физиологический конгресс, Рим, 1932 г.).

И действительно, с того момента, как психологами была признана неразрывная связь физиологических процессов головного мозга и нервной системы в целом с психической деятельностью (мышлением, вниманием, восприятием, речью и др.), нейрофизиологические методы начали постепенно внедряться в психологические исследования, в настоящее время занимая там прочное место. На данный момент большинство направлений современной западной психологии развиваются в тесной связи с нейронауками, а подготовка специалистов идет с ориентацией на практику в организации междисциплинарных научных исследований [6].

Преимущества нейрофизиологических методов по сравнению с другими психодиагностическими методиками (например, тестами), очевидны – в отличие от субъективных отчетов испытуемых они дают информацию об объективных параметрах процесса, имеют возможность зафиксировать психофизиологическую реакцию до миллисекунд, выявить некоторые неосознаваемые нами процессы (которым мы сами не можем

дать отчет) и т.д. Объективизация измерения в психологии позволяет локализовать множество факторов, связанных с намеренным искажением или субъективной погрешностью фиксируемых данных. При этом, несмотря на перечисленные преимущества, изучение именно психических процессов и явлений с помощью данной группы методов имеет свои сложности. Основной проблемой является валидность результатов, полученных с использованием нейрофизиологических методов – действительно ли регистрируемые нейрофизиологические показатели релевантно характеризуют то психологическое явление, которое интересует исследователя? Возможно ли в принципе с помощью данных методов комплексное исследование психологических феноменов? Эти вопросы возникают в связи с тем, что, несмотря на прорыв в области нейрокогнитивных исследований, решение психофизиологической проблемы до сих пор остается открытым.

В ходе статьи мы кратко и последовательно раскроем сущность и роль нейрофизиологических методов в психологических исследованиях, а также обозначим ряд проблем в данной области и то, как мы видим перспективы их совместного с психологами, метрологами и нейрофизиологами решения.

Основная цель нейрофизиологических исследований психических явлений – поиск и объяснение физиологических закономерностей и механизмов, служащих основанием психической активности человека. Данная область исследований получила название «картирование мозга» (brain imaging), или «чтение мозга» (brain reading) [2, 11, 12]. Принцип работы таких измерительных приборов как фМРТ или ЭЭГ строится на измерении электромагнитных волн (для фМРТ) и электрических сигналов, исходящих с поверхности головы (для ЭЭГ). Другими вариантами выступают регистрация магнитных полей, генерируемых мозгом в результате его нейронной активности (МЭГ), а также фиксация изменения скорости обмена веществ в активированных зонах мозга, включенных в решение задачи (ПЭТ).

Наиболее часто данные технологии используются при изучении когнитивной активности мозга, результатом которого становится картирование зон мозга, ответственных за распознавание и восприятие различных объектов (лиц, цвета, речи, изображения тела человека или его частей и т.п.), анализ речи, решение разнообразных задач, научение, саморегуляцию, познавательную активность и т.д. Приведем несколько примеров.

Одним из вопросов психологической теории является наличие или отсутствие единого механизма внимания. Данный вопрос активно исследуется с помощью нейрофизиологических методов – ведется поиск зоны головного мозга для разных форм зрительного внимания [5, 9].

Другой пример. В результате исследований активности мозга с помощью фМРТ в ситуациях, когда человек говорил неправду, было выявлено, что разные типы лжи (о прошлом или будущем, о других, о себе) имеют некоторые отличия в паттернах активности мозга. При этом паттерны в целом при воспроизведении лжи сильно отличаются от паттерна активности мозга тогда, когда человек говорит правду [8, 14]. Еще пример. Для решения психологических проблем образования изучаются нейрофизиологические ресурсы рабочей памяти и механизмы социального поведения [10, 13]. Как следствие, формируется доказательная база для оптимизации процессов усвоения учебного материала и регуляции поведения школьников [3].

Таким образом, данные методы позволяют регистрировать ход переработки информации, а также получить схематизированное изображение когерентно работающих зон мозга в процессе решения определенной задачи.

Проведенный нами анализ исследований психических явлений с помощью нейрофизиологических методов позволил нам выделить ряд проблем и спорных моментов:

1. Выбор оптимального метода и средств измерения, который приведет к наиболее точным результатам. От средств, и, соответственно, методов измерений зависит правильное определение значения измеряемой величины [1]. Среди объективных недостатков ЭЭГ выделяют очень низкое пространственное разрешение (точность локализации «наблюдаемого явления» варьирует от 0,5 до 1,5 см). Таким образом, описание некоторых психических явлений с его помощью становится неполным, многое скрыто от исследователя, и вывод, который он делает на основе только этих данных, односторонний. Это может компенсироваться использованием других методов, например, МРТ (томографический срез достигает 1 мм), но у него тоже есть недостаток – низкое разрешение по времени. То есть исследователю нужно определиться, что более точно измерит интересующее его явление, оптимально отразит его сущность – и сделать выбор в пользу времени или же локализации. Неправильный выбор может привести к некорректным выводам.

2. Другая проблема, с которой сталкивается исследователь при определении средств измерений, это то, что многие психические явления носят комплексный характер, имеют сложные составляющие. Например, творческое мышление, которое в настоящее время активно изучается с помощью ЭЭГ, фМРТ (О. М. Разумникова, М. Г. Старченко, С. Г. Данько, О.С. Саакян, Д. В. Захарченко и Н.Е. Свидерской, R. Arden, Robert S. Chavez, R. Grazioplene, Rex E. Jung). А. Fink с коллегами (2007) было проведено исследование активности зон головного мозга в диапазоне альфа-ритма при решении творческих (изобретении необычного

использования обычных предметов) и нетворческих заданий (простая характеристика свойств предметов). Были выявлены следующие значимые различия – мощность альфа-ритма в правой затылочной области выше у более креативных участников исследования, чем у менее креативных. Но стоит отметить, что при решении данных задач была задействована совокупность процессов, сложно отделимых друг от друга – память, восприятие, речь, внимание, воображение. Целесообразно ли все это обобщить под названием «креативность»? Как их дифференцировать друг от друга и измерить, какой вклад вносит каждый из них в креативность на уровне нейрофизиологии? В настоящее время эта проблема остается нерешенной, что вносит определенные трудности в изучение сложных психических явлений с помощью нейрофизиологических методов.

Наличие данной проблемы выражается и в получении противоречивых данных при использовании одного и того же метода для изучения одного и того же явления. Например, обращаясь к другим исследованиям креативности: результаты одних из первых электрофизиологических исследований показали повышение активности лобных долей коры ГМ во время решения творческой задачи, других – снижение [4]. При объяснении подобных противоречий ученые сходятся во мнении, что, с одной стороны, существует локальная специализация мозга, а с другой – гибкий учет принципов его работы (К.С. Лешли, И.П. Павлов). Но это объяснение, на наш взгляд, не должно исключать устранение недостатков в нейрофизиологических измерениях и поиск лучшего доказательства соответствия физиологических процессов психическим.

3. Еще одна проблема – учет степени сложности и динамичности функциональной активности психической системы. Нейрофизиологическое измерение предполагает фиксацию последовательности изменений протекающих процессов и вариативность их изменчивости во временном диапазоне. Решение проблемы синхронизации одновременно активирующихся зон мозга решается на основе спектрального анализа, устанавливающего степень когерентности происходящих изменений между разными участками мозга (в интернейрональной сети). Однако, умственная активность характеризуется не только последовательным движением в домене (активированной зоне головного мозга) и взаимодействием между зонами, но и может протекать разными путями внутри домена, в результате образуя сложную внутреннюю (интранейрональную) сеть, изменчивость которой зависит от индивидуальной архитектоники и пластичности мозга. Дополнительными факторами выступают процессы развития и деградации нейрональной сети, рост активности которой отражает процессы реорганизации мозга на определенном этапе жизнедеятельности, свидетельствуя о возможностях в

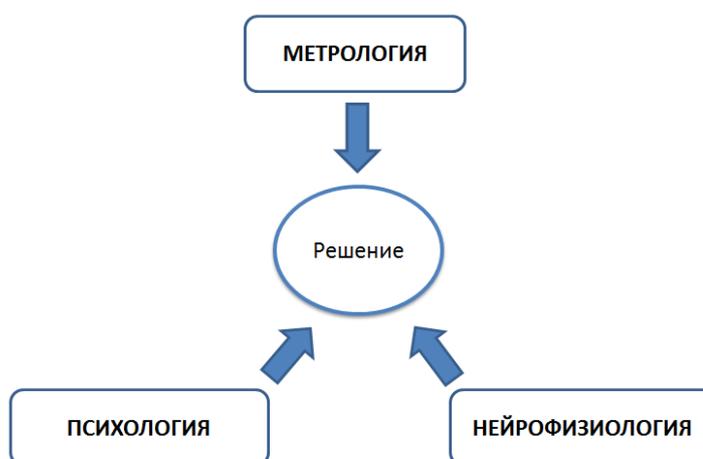
определенном возрасте и контексте. На этом фоне представляется затруднительным учет всего спектра вариаций и повторение измерений для получения реплицируемого результата в имеющейся системе нейрофизиологических координат, не говоря уже о трансформации его на язык психометрии с целью последующей обработки. Как следствие, возникает сразу две проблемы. Во-первых, исследователям приходится упрощать интерпретацию данных, усредняя их и вынося за скобки принципы работы мозга как саморазвивающейся системы, например, такие как флуктуация и неравновесность. Во-вторых, данные нейрофизиологических измерений и психологические (поведенческие) данные обрабатываются раздельно, и их совместная интерпретация для более глубокого понимания природы психического явления крайне затруднительна.

4. Обеспечение точности измерений психических явлений на основе нейрофизиологических методов. Повышение «точности» измерений – это задача исследователей метрологов, психологов или нейрофизиологов?

Одна из основных трудностей, которая может возникнуть при решении данной проблемы, и на которую указывал Черноризов А.М., как нам кажется, это различие в терминологическом аппарате при описании психических явлений, мозговых механизмов и измерительных систем в разных науках. Черноризов А.М., иллюстрируя данную проблему, приводит следующий пример: в понятийном аппарате психологии доминируют качественные категории («смысл», «ценность», «Я-концепция»), а в понятийном аппарате естественно-научных дисциплин (в частности, нейронаук и метрологии) — количественные категории («масса», «энергия», «мощность», «электрический потенциал» и т.п.) [6]. Вследствие данных особенностей может возникать недопонимание между представителями разных наук при построении междисциплинарных исследований. Например, психологам нужно при описании психических явлений перейти на язык метрологии, то есть разложить психические явления на конкретные единицы величин (скорости, напряжения, объема и т.п.), которые можно объективно измерить. Найти корреляты нематериального, недоступного для прямого наблюдения психического явления с материальным, наблюдаемым. Это не всегда является очевидным, возможным и правомерным, исходя из вышесказанного. Можем ли мы измерить «объем» творческого мышления в принятых для этого единицах измерения – в метрах? Очевидно, что такое сопоставление невозможно. Тем не менее, единое понимание сущности какого-либо явления для представителей различных областей науки может помочь повысить понимание того, что именно нужно измерить, и как следствие, повысить точность измерения и интерпретации результатов.

Решение вопроса о том, что именно будет измеряться и какими методами, является принципиально важным для получения достоверного результата. Как правило, когда речь идет об исследовании психического явления нейрофизиологическими методами, то психологи прежде всего обращаются к знаниям нейрофизиологии. При этом важную роль играет обеспечение единства и точности измерений, что и является одной из задач метрологии.

Таким образом, для разрешения выявленных противоречий при измерении психических явлений с помощью нейрофизиологических методов требуется активное сотрудничество специалистов всех обозначенных областей (рис.1).



## Литература

1. Бисерова В.А., Демидова Н.В., Якорева А.С. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: ЭКСМО. 2007. 10 с.
2. Иваницкий А.М. “Чтение мозга”: достижения, перспективы и этические проблемы. Журнал высшей нервной деятельности. 2012. Т. 62, вып. 2. С. 133–142.
3. Костромина С.Н., Бордовская Н.В., Искра Н.Н., Чувгунова О.А., Гнедых Д.С., Курмакаева Д.М. Нейронаука, психология и образование: проблемы и перспективы междисциплинарных исследований. Психологический журнал. 2015. Том 36, №4, С. 61-70.
4. Маркина Н.В. Загадки и противоречия творческого мозга. Химия и жизнь. 2008. №11. URL: [http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya\\_biblioteka/430728/Zagadki\\_i\\_protivorechiya\\_tvorcheskogo\\_mozga](http://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/430728/Zagadki_i_protivorechiya_tvorcheskogo_mozga)
5. Фаликман М.В. Внимание. М.: АСАДЕМ'А, 2006. 453 с.

6. Черноризов А.М. «Проблемное поле» современной психофизиологии: от нанонейроники до сознания. Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2007. № 3. С. 15-43.
7. Fink A., Benedek M., Grabner R.H., Staudt B., Neubauer A.C. Creativity meets neuroscience: Experimental tasks for the neuroscientific study of creative thinking. *Methods*. 2007. № 42. P. 68–76.
8. Ganis G., Kosslyn S.M. fMRI studies of different types of deception. *International Journal of Psychophysiology*. 2006. Vol. 61, №3.
9. Kanwisher N, Wojciulik E. Visual attention: insights from brain imaging. *Nature Reviews: Neuroscience*. 2000. №1. P. 91–100.
10. Kegan R. What “form” transforms?: a constructive-developmental approach to transformative learning. In J. Mezirow and Associates (eds.). *Learning as transformation: critical perspectives on a theory in progress*. San Francisco: Jossey-Bass. 2000. P. 35–70.
11. Posner M.I., DiGirolamo G.J., Fernandez-Duque D. Brain mechanisms of cognitive skills. *Consciousness and cognition*. 1997. №6. P. 267– 290.
12. Rose N. Reading the human brain: how the mind became legible. *BODY & SOCIETY*. 2016. Vol. 22 (2). P.140-177.
13. Schrott L.M. Effect of training and environment on brain morphology and behavior. *Acta Paediatrica Scandanavia*. 1997. № 422 (Suppl). P. 45–47.
14. Vendemia, J.M.C. Detection of deception. *Polygraph*. 2003. №32(2). P. 97-106.

# ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕГРАДУИРОВАННОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ ШКАЛЫ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ОЦЕНОЧНОГО СТИЛЯ ЭКСПЕРТА

Николаева И.А.

*Курганский государственный университет*

[nikolaeva-irina@yandex.ru](mailto:nikolaeva-irina@yandex.ru)

Точность экспертной оценки зависит от ряда факторов. В качестве наиболее сильных, влияющих на процесс оценивания, называют тип оценочной шкалы, способ представления объектов эксперту и заданный способ оценивания [6]. Это «внешние», заданные факторы. Наиболее весомым «внутренним» фактором следует считать *оценочный стиль* эксперта. Понятие «оценочный стиль» означает устойчивые предпочтения человека к использованию тех или иных *способов оценивания* [1, 2].

Оценочный стиль, с одной стороны, отражает индивидуальные эмоционально-когнитивные особенности эксперта, поэтому исследователи оценочного стиля утверждают наличие универсальных стилевых характеристик экспертов, проявляющихся в их оценках безотносительно к объектам оценки.

С другой стороны, оценочный стиль существует в рамках определенной *задачи и условий оценивания*, которые способствуют или препятствуют проявлению конкретных параметров оценочного стиля. Несмотря на внешне заданные условия, оценочная деятельность осуществляется по внутренним правилам субъекта, особенно если это касается оценки социальных объектов и явлений, других людей. ИмPLICITные правила обычно не осознаются самим экспертом. По мнению Р. Сесconi, F. Franceschini, M. Galetto, [7] общие имPLICITные процессы лежат в основе и предпочтения, и оценки, и измерения. Поэтому, обсуждая далее оценочный стиль эксперта, мы будем иметь в виду и стиль предпочтений.

Условия экспериментов, в которых моделируется оценочная деятельность, а также различные *способы обработки экспертных оценок* позволяют выявить определенные параметры оценочного стиля. В организации условий оценивания, в подборе оценочной шкалы возникает *проблема соответствия или совместимости (compatible)* [8] заданной шкалы способу мышления эксперта. Масштаб шкалы должен быть наиболее значим для эксперта. Кроме того, существует проблема кодификации субъективной информации.

Для объективации скрытых имPLICITных процессов используют различные приемы. Наиболее известным и точным средством фиксации имPLICITных предпочтений считается скорость реакции при выборе

предпочитаемого стимула в задаче оценки объекта на принадлежность той или иной категории (имплицитный ассоциативный тест, IAT). Ограничением данного метода является выявление имплицитных предпочтений по отношению только к отдельному объекту или отдельной категории.

В психосемантическом эксперименте также выявляются индивидуальные имплицитные предпочтения, которые влияют на оценки объектов. Н.Н.Батурин, И.В.Выбойщик, предлагали экспертам полярные психосемантические шкалы («тяжелый-легкий», «хороший-плохой» и пр.) для оценки искусственных объектов. После экспертизы шкалы градуировались по 10-балльной системе для последующей статистической обработки экспертных оценок, что позволило выделить целый ряд параметров оценочного стиля: *валентность, поляризация, детализация, изменчивость, оценочность, дифференцированность* [2].

В современных прикладных исследованиях широко используется шкала «best-worst», в том числе для оценки сложных многопараметрических объектов в условиях высокой неопределенности, а также для решения проблем совмещения экспертных оценок в групповых решениях [9]. Данная шкала предлагается в форме дискретного биполярного выбора.

В нашем эксперименте также была поставлена задача выявить оценочный стиль, обусловленный глобальными имплицитными представлениями о наилучшем и наихудшем.

Новизна нашей экспериментальной процедуры изучения оценочного стиля состоит в ряде свойств, которые мы внесли в использование шкалы «best-worst». Модификация шкалы обусловлена тем, что она предназначена для выявления оценочного стиля сложных социальных объектов и явлений, непосредственно связанных с личностными ценностями экспертов. В конструировании шкалы мы стремились решить вышеуказанные проблемы «совместимости» шкалы с имплицитными мерами экспертов и проблему кодификации субъективной информации.

Во-первых, шкала является континуальной и неградуированной, что дает возможность экспертам реализовать свой имплицитный способ оценки, не ограничивая его каким-либо масштабом. Во-вторых, социальные оценки всегда соотносятся с Я-системой как системой отсчета. Интуитивно субъект «примеряет на себя» лучшее или худшее, или равноценное себе. Поэтому на данной шкале присутствует «Я»-критерий (Self). Данный критерий вносится на шкалу перед процедурой оценки самим экспертом, поскольку критерии «best», «worst», «Self» имплицитно взаимосвязаны и взаимоопределяемы, и их соотношение индивидуально. Третье свойство шкалы – соответствие культурному стереотипу оценки социальных явлений в форме культурной метафоры «низшее – высшее».

Оценки «низшее – высшее» применяются во всех областях гуманитарной сферы и отражают фундаментальные ценностные отношения человека. Поэтому наша шкала «best – Self – worst» имеет форму вертикали: «низшее (наихудшее) – высшее (наилучшее)».

Проблема выбора значимых объектов для экспертной оценки решалась следующим образом: эксперты записывали всех людей, которые «приходили им в голову». Первоначально инструкция предусматривала выписать 100 человек. В последующих экспериментах формулировка была изменена на «не менее 50». В последних экспериментах инструкция стала еще более свободной: требуется, записывать людей «до тех пор, пока они приходят в голову». Таким образом, «вычерпывается» доступное для эксперта социальное содержание его сознания в виде образов других людей. Именно к другим людям у каждого субъекта имеется некоторое устойчивое пристрастное отношение в форме ценностной оценки. Совокупность этих оценок, которые в такой форме «хранятся» в сознании и могут быть эксплицированы, позволит нам выявить устойчивые свойства оценочной деятельности экспертов.

Проблема кодификации содержания информации, соответствия оцениваемых категорий имплицитному значению этих категорий у экспертов была решена тем, что в эксперименте мы могли исключить все другие оценочные категории помимо трех вышеуказанных. Категории «best», «worst», «Self» являются максимально обобщенными, самыми универсальными в человеческой культуре. С другой стороны, они подразумевают высокую индивидуализацию содержания для каждого субъекта. Таким образом, использование данных категорий позволяет снять противоречие между общим и индивидуальным, имплицитным. Для выявления оценочного стиля эксперта в данном случае мы можем обойтись без конкретизации индивидуального содержания этих общих категорий<sup>1</sup>.

Процедура оценки заключается в том, что эксперт размещает на биполярной вертикальной шкале «наилучшее (best) – наихудшее (worst)» сначала себя (Self), затем последовательно всех других из своего списка под порядковыми номерами.

Ранее мы писали, что визуальная конфигурация распределения оценок на данной шкале является индивидуально устойчивой и сохраняется для разных массивов оценок в ретестовых исследованиях [3]. Можно выделить типы распределения оценок, которые свидетельствуют о различном использовании измерительных шкал разными субъектами.

---

<sup>1</sup> Если стоит задача выявления семантического стиля эксперта – т.е. задача выделения конкретных признаков социальных отношений, по которым эксперт преимущественно делает свои оценки, то описанная процедура может быть дополнена имплицитным словарем признаков. Соответствующая модификация экспериментальной процедуры в данной статье описана не будет.

1 тип – имеются 2-3 группы оценок на шкале, как правило, «привязанные» к полюсам. Данное распределение обусловлено использованием шкалы наименований.

2 тип – группировки отсутствуют, оценки распределены по шкале с равным интервалом между ними. Здесь типична порядковая шкала. Возможно совместное использование двух названных шкал, что проявляется в ранжировании «низших» и «высших» оценок.

3 тип – группировки и одиночные оценки на шкале разделены интервалами разной длины [4]. Этот тип распределения характерен для здоровых взрослых со сформированной способностью к оценке. Здесь явное использование всех типов измерительных шкал. Интервальная шкала здесь интуитивно используется для обозначения «едва заметного различия» между оценками – это минимальные интервалы на шкале. У разных экспертов они имеют разный размер и демонстрируют индивидуальный «масштаб» дифференциации оценок. Шкала отношений проявляется здесь как устойчивое соотношение интервалов разной длины между группировками оценок. Соотношение интервалов между группами оценок и полюсами сохраняется в ретестовых исследованиях [3]. Таким образом, результаты оценивания в нашем случае становятся доступными измерению! Мы можем зафиксировать числом наблюдаемое соотношение минимального интервала и других интервалов между группами оценок.

Изучая структуру 3-го типа, мы выявляем стилевые черты оценочной деятельности эксперта. Некоторые особенности широко известны и являются типичными в описании оценочной деятельности:

- общая позитивно-негативная асимметрия или валентность (частота оценок выше/ ниже среднего);
- степень экстремальности крайне высоких и крайне низких оценок;
- поляризация оценок (частота крайне позитивных и крайне негативных оценок);
- индивидуальный масштаб шкалы, который проявляется в пропорции минимального интервала к общей длине шкалы.

Кроме них, были выделены новые стилевые параметры, которые представлены устойчивой величиной интервалов между типичными группами оценок:

- величина интервала между группой «наивысших» оценок и нижестоящими оценками (степень противопоставления «лучшего» и «наилучшего»);
- величина интервала между группой «низших» оценок остальным (противопоставление «худшего» и «наихудшего»).

Также выделены параметры, связанные с Я-критерием: степень сближения себя с теми, кто «лучше», и с теми, кто «хуже»; склонность оценивать других как равноценных Я.

Необходимо уточнить психологическое содержание названных особенностей оценочной деятельности. Какую функцию они выполняют, какие процессы отражают?

Для ответа на этот вопрос были проведены корреляционные исследования с использованием методов психологической диагностики [3, 4, 5]. Обобщая результаты этих исследований, можно заключить, что выявленные устойчивые особенности оценочной деятельности являются результатом общих *установок* оценивания. Данные установки отражают обобщенные ценностные отношения эксперта и проявляются в особенностях его социального восприятия, в готовности выставить определенные оценки.

В таблице 1 представлено содержание установок, детерминирующих выявленные стилевые параметры оценочной деятельности.

Таблица 1– Содержание ценностных установок, имплицитные критерии и имплицитные условия оценки

Параметры оценочного стиля (или установки в оценочной деятельности)	Имплицитные критерии оценки и дополнительные имплицитные условия оценки
склонность давать максимально-позитивные оценки	интуитивный критерий «наилучшего»; условие: вероятность существования других, близких к «наилучшему»
склонность абсолютизировать максимальные оценки	интуитивный критерий «наилучшее»; условие: вероятность существования абсолютного «наилучшего» в реальности
склонность противопоставлять максимальные оценки другим (акцентирование исключительности «наилучших» оценок)	текущий критерий – текущие «наилучшие» оценки условие: ориентация на возможности (доступность/ недоступность), исключительности «наилучшего»
склонность давать минимальные (негативные) оценки	интуитивный критерий «наихудшее»; условие: вероятность существования других, близких к «наихудшему»
склонность абсолютизировать негативные оценки	интуитивный критерий «наихудшее», условие: вероятность существования «наихудшего» в реальности
склонность противопоставлять крайне негативные и другие негативные оценки (подчеркивать исключительность «наихудших»)	текущий критерий – «наихудшие оценки» условие: ориентация на нормы, на различие между допустимым и недопустимым

Параметры оценочного стиля (или установки в оценочной деятельности)	Имплицитные критерии оценки и дополнительные имплицитные условия оценки
склонность ценить других «выше среднего»	интуитивный критерий «золотой середины» условие: интуитивная вероятность «хорошего» или оптимизм/пессимизм
склонность сближать себя с теми, кто «выше»	«Я-критерий»; условие: ориентация на достижение, вероятность достижения
склонность сближать себя с теми, кто «ниже»	«Я-критерий»; условие: ориентация на предотвращение «худшего», вероятность ошибки в негативной оценке
склонность оценивать других равноценно себе	«Я-критерий»; условие: ориентация на равенство или на безоценочное принятие кого-либо в силу особой значимости

Практические следствия. Обнаружение естественных механизмов вынесения оценки позволяет выделить новые параметры оценочного стиля, которые могут иметь существенное значение в определенных областях экспертизы. Выделение ряда устойчивых параметров оценочного стиля позволяет предложить соответствующую типологию экспертной деятельности, которая может иметь практическое значение для определения эффективности оценочного стиля в данных сферах.

Назовем возможные сферы экспертной деятельности:

Оценка конкурсных социальных проектов или продуктов по критерию «идеального», например, для вознаграждения. Здесь возможны явные различия экспертов в стремлении оценить всех как достойных высших оценок и, наоборот, оценить всех как не заслуживающих высших оценок.

Оценка социальных объектов по критерию «наихудшего» и недопустимого касается сферы судебных решений, определение степени тяжести наказаний.

Оценка социальных объектов с условием возможности достижения идеала, связана с оценкой риска выполнения проекта в любом виде деятельности. Например, возможность медицинского вмешательства будет оцениваться позитивно экспертами с установкой «достижимости» наилучшего результата. Но эксперты с установкой «недостижимости наилучших результатов» перспективу медицинского вмешательства чаще оценят как негативную.

Оценка социальных объектов (других людей) в сфере социальной помощи. Для данной сферы значимой является установка к сближению себя с теми, кто «ниже». В этом случае другие с большей вероятностью будут оценены как «нуждающиеся в помощи».

В некоторых сферах деятельности – например, в педагогической, в управлении персоналом – важны все оценочные стили для оценки «человеческого фактора». Очевидно, что индивидуальный экспертный стиль в таких видах деятельности значительно определяет профессиональное общение, специфику и эффективность деятельности.

## Литература

- 1 Батулин Н.А. Психология оценки: общие представления, дифференциация понятий и области изучения // Вестник ЮУрГУ. 2008. № 31, серия Психология, вып. 1, С. 17-31.
- 2 Выбойщик И.В. Оценочный стиль как один из факторов точности оценивания// Вестник ЮУрГУ. 2008. № 32. серия Психология, вып. 2, С.29-36.
- 3 Николаева И.А. Пространственное измерение ценностной сферы личности. Курган: Изд-во Курганского государственного университета, 2007. 166с.
- 4 Николаева И.А. Мир измерений. 2013, №11. - С.40-45.
- 5 Николаева И.А. Зайнулина Ю.И. Ценностное отношение и личностные качества педагога Психологическая наука и образование [www.PSYEDU.RU](http://www.PSYEDU.RU). Изд-во Московский городской психолого-педагогический университет, Москва. Том 8. №1, 2016. С.11-23.
- 6 Серенков П.С., Романчук В.М., Иванова Н.Н. Исследование достоверности методов экспертного оценивания //Метрология и приборостроение. 2016. №1. С.22-30.
- 7 P. Cecconi, F. Franceschini, M. Galetto Measurements, evaluations and preferences: A scheme of classification according to the representational theory // Measurement 39 (2006) 1–11. - [www.elsevier.com/locate/measurement](http://www.elsevier.com/locate/measurement). doi:10.1016/j.measurement.2005.10.012
- 8 R.M. Dawes, T.L. Smith, Attitude and opinion measurement, in: G. Lindzey, E. Aronson (Eds.), Handbook of Social Psychology, vol. 1, Random House, New York, 1985.
- 9 Mou Qiong, Xu Zeshui, Liao Huchang An intuitionistic fuzzy multiplicative best-worst method for multi-criteria group decision making. Information Sciences Volume 374, 20 December 2016, Pages 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.08.074>

## ПАРАДИГМЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Шишкин И.Ф.

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

Многие годы ИЗМЕРЕНИЕМ называлось «Нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств» [1]. Под ФВ понималось «Свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта». По умолчанию предполагалось, что и сами объекты, и их свойства относятся к материальному миру. Измерения могли быть объективными (инструментальными) и субъективными (органолептическими), но ПАРАДИГМА измерений состояла в том, что

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ОБЪЕКТИВНЫМИ.
--

Это достигалось с помощью обеспечения ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, обуславливающего сходимость результатов измерений к объективному (истинному) значению физических величин и воспроизводимости их в разных условиях.

В 1968-м году появилась статья об измерении качества продукции [2]. Ее авторы предлагали показатели свойств **товарной продукции**, полученные путем прямых измерений, объединять в некоторые комплексные показатели, характеризующие ее качество. Они определили эту науку, получившую название *квалиметрия*, как научно-прикладную математическую дисциплину, не имеющую отношения к метрологии, хотя в такой постановке вопроса измерение качества является косвенным измерением. Свою точку зрения они отстаивают до сих пор [3].

Противоположная точка зрения, заключающаяся в том, что *квалиметрия* – раздел метрологии, изучающий вопросы измерения качества, разрабатывалась параллельно в высшей школе. Она представлена работами [4-7]. В этом направлении были выполнены масштабные государственные проекты [8,9] по измерению качества **услуг**, подтверждавшие продуктивность и практическую значимость теоретических разработок.

В 2000-м году вышла новая версия международных стандартов ISO серии 9000, распространившая идеологию TQM (total quality management – всеобщее управление качеством) на системы менеджмента качества. Под

качеством стали понимать степень удовлетворенности продукцией и услугами потребителей и заинтересованных сторон. Удовлетворенность – не физическая величина. Это душевное состояние человека, нематериальное свойство (НМС) его натуры. Степень своей удовлетворенности человек определяет (измеряет) сам экспертным методом, а результат измерения формулирует в виде МНЕНИЯ. Можно сказать, что идеология TQM и стандарты ISO 9000:2000 поставили задачу прямого измерения НМС, а квалиметрия подсказала пути ее решения и подготовила для этого почву.

Под влиянием успехов квалиметрии в законодательной метрологии стали происходить постепенные изменения. Сначала из определения термина «измерение» исчезло слово «физическая» величина. В первой редакции закона «Об обеспечении единства измерений» [10] этого слова уже не было. Затем в ГОСТ Р 8.000–2000 «ГСИ. Основные положения» появилось определение: «нахождение значения величины опытным путём с помощью технических средств» [11]. Измерения НМС стали легитимными, но применение экспертных методов измерений еще долго оставалось вне закона [10]. Только с выходом новой редакции этого закона [12] положение изменилось. В ней содержалось следующее «основное понятие»: «Измерение – совокупность операций, выполняемых для определения количественного значения величины», т.е. не было ни упоминания о технических средствах, ни прилагательного «физическая» величина. Наконец, теория индикатора как средства измерений по шкале порядка [13] перевела так называемую «квалиметрическую шкалу оценок» в разряд обычных измерительных шкал. Сложились все предпосылки для создания теории измерений НМС.

НМС существуют только в сознании людей. Проблема мозга и сознания (материальной и идеальной сущностей) является центральной проблемой философии. Она сводится к решению главного философского вопроса о том, что первично, а что вторично. Вопрос о реальности этих двух субстанций (материальной и идеальной) давно не стоит. Они получили название ОБЪЕКТИВНОЙ и СУБЪЕКТИВНОЙ реальностей [14].

По определению В.И. Ленина, «материя есть объективная реальность». Субъективная реальность это представление о мире, сформированное в СОЗНАНИИ людей. Она имеет нематериальный характер и состоит из представлений, мыслей и мнений о нематериальных свойствах объектов и явлений материального и идеального миров. Субъективная реальность является ОТРАЖЕНИЕМ объективной реальности. Материальным носителем ее является мозг человека. Субъективная реальность информационно изоморфна (идентична) состояниям мозга. Связь между объективной и субъективной реальностями

осуществляется посредством ИНФОРМАЦИИ, согласно принципу ее инвариантности по отношению к материальным и нематериальным носителям.

В дальнейшем под НМС будем понимать ОТРАЖЕНИЯ в субъективной реальности свойств объектов и явлений материального мира. Информация об объективной реальности поступает от рецепторов человека в мозг и отражается в СОЗНАНИИ с помощью МЫШЛЕНИЯ, способного выполнять такие мысленные операции, как «абстрагирование», «конкретизация», «обобщение», «анализ», «синтез» и «сравнение». С помощью трех первых операций в сознании формируются представления о простых НМС на основе их проявлений (признаков) в материальном мире (рис. 1).

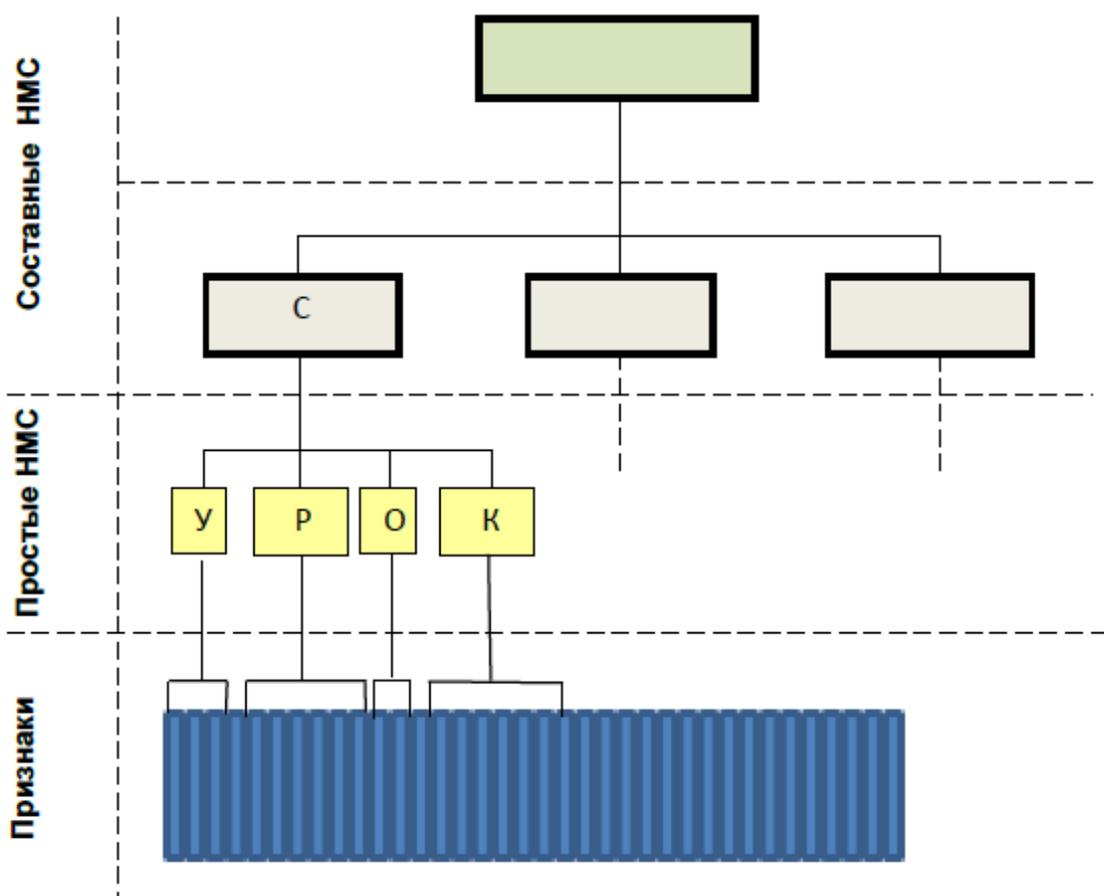


Рисунок 1. Формирование НМС

С помощью двух последующих осуществляется декомпозиция и комплексирование НМС на разных уровнях интеграции. Подобно тому, как ФВ подразделяются на основные и производные, НМС делятся на простые и составные. Простые НМС являются отдельными элементами составных; составные – состоят из набора простых или составных нижнего уровня. Например, такое составное НМС, как *самостоятельность* человека, включает в себя набор простых НМС: *уверенность*,

*решительность, ответственность, компетентность.* Составляющими *интеллигентности* человека являются простые НМС его натуры: *культурность, вежливость, воспитанность, тактичность.*

НМС могут быть выражены в большей или меньшей степени, т.е. имеют количественную характеристику, что предполагает возможность их измерения с помощью мысленной операции «сравнение».

При измерении ФВ по шкале порядка ее размер может сравниваться с размером, равным 0. Равенство измеряемого размера нулю означает отсутствие этого свойства, а положительный результат сравнения означает обнаружение этой ФВ [13]. Средства измерений, предназначенные для обнаружения ФВ, называются *индикаторами.*

При однократном измерении простого НМС, имеющего единственный признак, эксперт играет роль *индикатора.* «Измерительным инструментом» является его МЫШЛЕНИЕ. Он мысленно (с помощью мысленной операции «сравнение») сравнивает информацию о проявлении НМС, поступающую извне, с представлением о том, что этого признака **НЕТ**. Это представление хранится в его памяти как отражение жизненного опыта, или децентрализовано воспроизводится в его сознании посредством обучения. Тем самым он как *индикатор* решает задачу обнаружения НМС, сравнивая его размер с размером, равным 0, то есть, выполняя измерение по шкале порядка. Результатом измерения является МНЕНИЕ (решение) эксперта об обнаружении им НМС. Числовое значение результата измерения с помощью знака дизъюнкции  $\vee$  может быть записано следующим образом:  $0\vee 1$ . В дальнейшем МНЕНИЕ эксперта **об обнаружении** НМС будет использоваться в качестве ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ.

Многократное измерение простого НМС, имеющего единственный признак, выполняется членами экспертной комиссии. Предположим, что результат измерения представлен табл. 1.

Таблица 1 – Результат измерения при равнозначимых мнениях

ЭКСПЕРТЫ	МНЕНИЯ
1	1
2	0
3	1
4	1
5	1
6	0
7	1
8	1
9	0
10	1
<b>РЕЗУЛЬТАТ</b>	<b>0,7</b>

Мнение каждого эксперта о наличии (обнаружении) НМС является единицей измерения. Если количественной характеристикой НМС считать показатель того, насколько общепринятым является это мнение, то числовым значением результата измерения может служить **доля** таких мнений от общего их числа. В данном случае она равна **0,7**. Показательно, что этот результат не совпадает с мнением ни одного из членов комиссии!

Из квалиметрии может быть заимствована идея учета **важности, значимости, авторитетности** или **весомости** мнений экспертов с помощью весовых коэффициентов. Эта процедура называется **РАССТАНОВКОЙ ПРИОРИТЕТОВ**. *Важность* сама по себе является НМС, и в качестве такового может быть измерена. Ниже будет использована такая возможность, а пока остановимся на случае, когда весовые коэффициенты мнений экспертов установлены **ДИРЕКТИВНО**, как это показано в табл. 2. Сумма весовых коэффициентов должна равняться 1. Тогда сумма весовых коэффициентов всех положительных мнений будет числовым значением результата измерения НМС экспертной комиссией (табл. 3).

Таблица 2

ЭКСПЕРТЫ	ВЕС.КОЭФ.
1	0,10
2	0,05
3	0,20
4	0,02
5	0,01
6	0,15
7	0,09
8	0,03
9	0,30
10	0,05
<b>Σ ВЕС.КОЭФ.</b>	<b>1,00</b>

Таблица 3

ЭКСПЕРТЫ	МНЕНИЯ
1	0,10
2	0
3	0,20
4	0,02
5	0,01
6	0
7	0,09
8	0,03
9	0
10	0,05
<b>РЕЗУЛЬТАТ</b>	<b>0,5</b>

Видно, что этот результат существенно (на 20 %) отличается от того, который был получен, когда все члены комиссии считались одинаково **квалифицированными и авторитетными** специалистами.

Использование **МНЕНИЯ**, не имеющего фиксированного размера, в качестве единицы измерения означает, что измерения НМС выполняются на основе **ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО** воспроизведения единицы измерения. Ничего необычного в этом нет. Такое уже было при использовании **антропометрических мер**.

При однократном измерении простого НМС, имеющего несколько признаков, экспертом выполняются однократные измерения каждого из

них. В табл. 4 проставлено мнение эксперта об обнаружении им III-го признака.

Таблица 4 - Обнаружение экспертом одного из признаков НМС

Признаки НМС	I	II	III	IV	Результат измерения НМС
Эксперт					
Иванов	0	0	1	0	0,25

Числовым значением результата измерения является **доля обнаружений** от общего числа мнений эксперта, выраженная в относительных единицах или в процентах.

При многократном измерении простого НМС, имеющего несколько признаков, всеми членами экспертной комиссии выполняются однократные измерения каждого из признаков, как это показано в табл. 5.

Таблица 5 – Многократное измерение экспертной комиссией простого НМС, имеющего несколько признаков

Признаки НМС	I	II	III	IV	Результат измерения НМС
Эксперт					
1	0	0	1	0	0,25
2	0	1	0	1	0,50
3	1	0	1	1	0,75
4	1	1	0	1	0,75
5	1	1	1	1	1,00
Доля обнаружений	0,6	0,6	0,6	0,8	0,65

Результат многократного измерения получается путем усреднения промежуточных данных по последнему столбцу или нижней строке табл. 5.

При однократном измерении составного НМС экспертом выполняются однократные измерения всех его составляющих. Единицей измерения служит МНЕНИЕ эксперта об обнаружении любой из них. Результатом измерения является **доля обнаружений** от общего числа мнений эксперта (см. табл. 6).

Таблица 6 – Однократное измерение интеллигентности

Составляющие НМС  Эксперт	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения НМС
	Иванов	1	0	1	1

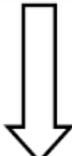
При многократном измерении составного НМС членами экспертной комиссии выполняются однократные измерения всех его составляющих. В правом столбце табл. 7 приведены результаты измерения интеллигентности каждым экспертом, что может иметь для них большое значение, если эксперты занимаются, например, набором персонала для предприятий и организаций различного профиля.

#### Измерение интеллигентности

Таблица 7

Признаки НМС  Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Доля обнаружений
	1	1	1	1	1,00
2	0	0	0	0	0,00
3	0	0	1	0	0,25
4	1	0	1	1	0,75
5	1	0	1	0	0,50
Результат измерения НМС					0,5

Таблица 8

Признаки НМС  Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения НМС
	1	1	1	1	
2	0	0	0		
3	0	0	1		
4	1	0	1		
5	1	0	1		
Доля обнаружений	0,6	0,2	0,8	0,4	0,5

Результат измерения интеллигентности экспертной комиссии в целом получается путем усреднения этих результатов измерений, и равен в данном случае **0,5**, или **50 %**. Показательно, что этот результат не совпадает с результатами измерений большинства членов комиссии, что нередко бывает причиной конфликтов.

Другой алгоритм обработки экспериментальных данных показан в табл. 8. Он применяется тогда, когда представляет интерес вклад каждой составляющей в итоговый результат измерения НМС. Сам результат получается тем же самым, но по ходу обработки экспериментальных данных извлекается важная измерительная информация об отдельных чертах характера человека, представшего перед экспертной комиссией.

Если промежуточные данные не представляют интереса, а важен только конечный результат измерения НМС, то он может быть получен путем непосредственного подсчета доли обнаружений составляющих членами экспертной комиссии среди общего числа их мнений.

В рассматриваемом случае он равен  $\frac{10}{4 \times 5} = 0,5$ .

Точно так же, как учитывалась авторитетность мнений членов экспертной комиссии, можно дифференцированно подойти к важности, значимости или весомости составляющих НМС. Если эксперты по-разному оценивают важность составляющих, то свою точку зрения они могут представить ранжированным рядом, расставив (и пронумеровав) составляющие в порядке возрастания их предпочтительности. Сумма предпочтений называется рангом.

Пусть, предположим, точки зрения экспертов представлены ранжированными рядами, сведенными в табл. 9, где ранг 1 означает предпочтение по сравнению с отсутствием составляющей. Результат измерения важности отдельной составляющей каждым экспертом представляет собой долю набранных ею предпочтений в общей сумме рангов, равной 10. Эти результаты приведены в табл. 10. Их можно использовать в качестве весовых коэффициентов мнений экспертов и усредненного мнения экспертной комиссии относительно важности, значимости или весомости составляющих НМС.

Таблица 9 – Таблица рангов

Составляющие интеллектуальности	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Сумма рангов
1	4	2	3	1	10
2	4	1	3	2	10
3	3	4	1	2	10
4	4	1	2	3	10
5	4	3	2	1	10

Таблица 10 – Таблица весовых коэффициентов

Составляющие интеллигентности	Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Сумма весовых коэффициентов
		1	0,4	0,2	0,3	0,1
2	0,4	0,1	0,3	0,2	1,0	
3	0,3	0,4	0,1	0,2	1,0	
4	0,4	0,1	0,2	0,3	1,0	
5	0,4	0,3	0,2	0,1	1,0	
<b>Усредненные весовые коэффициенты по мнению экспертной комиссии</b>		0,38	0,22	0,22	0,18	1,0

Тогда результаты измерения *интеллигентности* будут выглядеть так, как это показано в табл. 11 и 12.

Таблица 11 – По мнениям экспертов

Составляющие интеллигентности	Эксперты	Культурность	Вежливость	Воспитанность	Тактичность	Результат измерения интеллигентности
		1	0,4	0,2	0,3	0,1
2	0	0	0	0	0,000	
3	0	0	0,1	0	0,025	
4	0,4	0	0,2	0,3	0,225	
5	0,4	0	0,2	0	0,150	
<b>Результаты измере- ния составляющих интеллигентности</b>		0,24	0,04	0,16	0,08	<b>0,13</b>

Таблица 12 – По мнению экспертной комиссии

<b>Составляющие интеллигентности</b>					
<b>Эксперты</b>	<b>Культурность</b>	<b>Вежливость</b>	<b>Воспитанность</b>	<b>Тактичность</b>	<b>Результат измерения интеллигентности</b>
<b>1</b>	0,38	0,22	0,22	0,18	0,250
<b>2</b>	0	0	0	0	0,000
<b>3</b>	0	0	0,22	0	0,055
<b>4</b>	0,38	0	0,22	0,18	0,195
<b>5</b>	0,38	0	0,22	0	0,150
<b>Результаты измерения составляющих интеллигентности</b>	0,27	0,044	0,176	0,072	<b>0,13</b>

Они отличаются от результатов, приведенных в табл. 7 и 8.

Измерения НМС, как и органолептические, относятся к **ЭКСПЕРТНЫМ**, но имеют существенные отличия. Это в полном смысле слова уникальные и неповторимые измерения. Вполне уместно назвать их **ЭКСКЛЮЗИВНЫМИ**. Их результаты справедливы только **ЗДЕСЬ** и **СЕЙЧАС**. Они отражают индивидуальную точку зрения лица, их выполняющего, или поименного коллектива (экспертной комиссии) в текущий момент времени, в конкретном месте, при определенных обстоятельствах и условиях их получения. Результаты эксклюзивных измерений являются субъективными потому, что субъективным является сам размер измеряемой величины. Он не имеет объективного числового значения.

Представление о разновидностях экспертных измерений можно получить из табл. 13.

Таблица 13 – Экспертные измерения

<b>ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ</b>	<b>ИЗМЕРЕНИЯ НЕМАТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ</b>
Применяются при измерениях ФВ – свойств объектов и явлений <b>материального</b> мира.	Выполняются при измерениях НМС – нематериальных свойств объектов и явлений как материального, так и <b>идеального</b> мира.
Выполняются по измерительным шкалам <b>интервалов</b> и <b>отношений</b> .	Выполняются по измерительной шкале <b>порядка</b> .
Измерения представляют собой сравнения с размером, принятым за <b>единицу</b> .	Измерения представляют собой сравнения с размером, равным <b>0</b> , что эквивалентно отсутствию НМС, или с другими размерами.
Единица измерения воспроизводится <b>эталон</b> ом.	Единицей измерения служит <b>мнение</b> одного человека – результат однократного измерения
Информация о размере единицы передается от эталона экспертам.	Мнение эксперта не имеет конкретного размера.
Измерения выполняются на основе <b>централизованного</b> воспроизведения единиц.	Измерения выполняются на основе <b>децентрализованного</b> воспроизведения единицы.
Результат измерения представляет собой <b>число единиц</b> .	Результат измерения представляет собой <b>число мнений</b> о наличии НМС, выраженное в процентах или относительных единицах.
Результаты измерений являются <b>объективными</b> . Они сходятся и воспроизводятся.	Результаты измерений являются <b>субъективными</b> . Они не сходятся и не воспроизводятся. Такие измерения называются <b>эксклюзивными</b>
Объективность результатов измерений обеспечивается ФЗ от 26.06.08 № 102.	<b>Легитимность</b> эксклюзивных измерений гарантируется Конституцией РФ.

ПАРАДИГМА измерений НМС формулируется следующим образом:

ИЗМЕРЕНИЯ НЕМАТЕРИАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ЯВЛЯЮТСЯ ЭКСКЛЮЗИВНЫМИ.

Требование обеспечения единства таких измерений несостоятельно. Их результаты субъективны, не сходятся и не воспроизводятся. Такие измерения выходят за рамки применимости ФЗ «Об обеспечении единства измерений», но не из правового поля законодательной метрологии, в которое входит Основной закон государства Конституция РФ. Легитимность (правомерность, законность) результатов эксклюзивных измерений гарантируется пунктом 3 статьи 29 этого закона: «Никто не может быть принужден к выражению своих мнений и убеждений или отказу от них». Аналогичная норма содержится в Международном праве: «Каждый человек имеет право на свободу убеждений и на свободное выражение их...» ст. 19 Всеобщей декларации прав человека, принятой Генеральной Ассамблеей ООН 10.12.1948 г.

С учетом измерений НМС структура общего пространства измерений может быть представлена такой, как это показано на рис. 2.

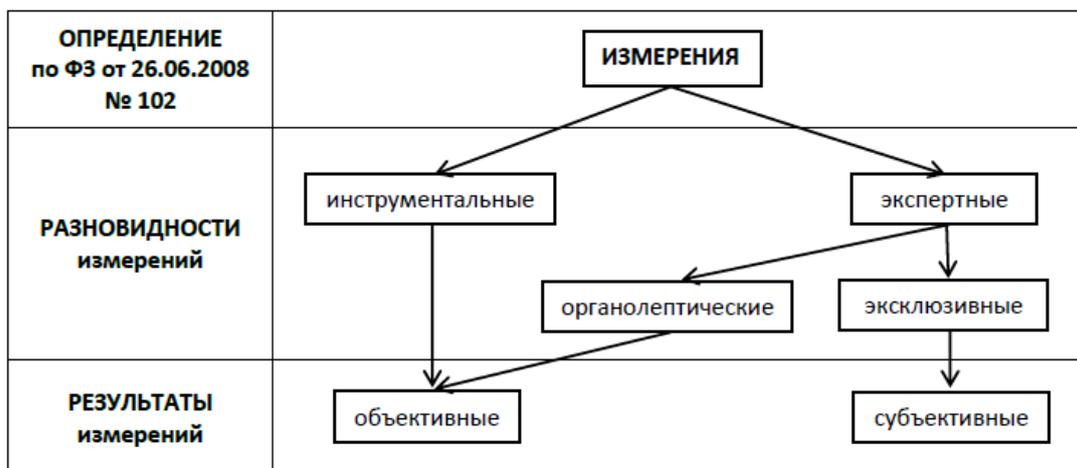


Рисунок 2. Пространство измерений

Здесь левая ветвь относится к метрологическому жизнеобеспечению в объективной реальности (с помощью материальных средств измерений), а правая к метрологическому жизнеобеспечению в субъективной реальности (с помощью нематериальных измерительных операций).

В заключение можно привести примеры, показывающие значение эксклюзивных измерений в жизни общества.

1. В июле 2002 г. над Боденским озером на юге Германии столкнулись два самолета. В авиакатастрофе архитектор из Северной Осетии Виталий Калоев потерял всю свою семью – жену, 10-летнего сына и 4-летнюю дочь. Через полтора года он убил диспетчера, по вине которого произошло столкновение авиалайнеров, нанеся ему 12 ножевых ранений. Суд Цюриха приговорил Калоева к 8 годам тюремного заключения.

В 2007 г. Калоева досрочно освободили за примерное поведение. На родине в Осетии его встретили как национального героя. Через год назначили заместителем министра строительства и архитектуры Осетии. В этой должности он проработал до выхода на пенсию.

В начале 2017 г. корреспонденты газеты «Комсомольская правда» обратились к Виталию Константиновичу по телефону с вопросом: «Не жалеете ли Вы сегодня о своем поступке?». «Не жалею» ответил Калоев.

Несоизмерима вина Калоева с точки зрения разных сообществ.

2. На рис.3 приведены данные социологического опроса, проведенного Левада-Центром 20-23 января 2017 г. по репрезентативной всероссийской выборке городского и сельского населения объемом 1600 человек в 137 населенных пунктах 48 регионов страны. Здесь же показаны результаты опросов за предыдущие годы. Вопрос, на который отвечали респонденты, формулировался так: «Какие чувства вызывает у вас личность И.В. Сталина?». Разброс мнений очевиден. Но общая тенденция изменения общественного мнения выражена четко: плохое забывается, а

признание хорошего возрастает. Казалось бы, ничего нового. То же самое можно сказать о памяти об Иване Грозном, Петре I, Николае II... Но одно дело сказать вообще, а другое дело оценить количественно. Измерения НМС позволяют поставить на строгую количественную основу многие гуманитарные, общественные и социальные науки. Появляется возможность интерполяции, предсказания обозримого будущего, что является одной из задач продуктивной научной деятельности.

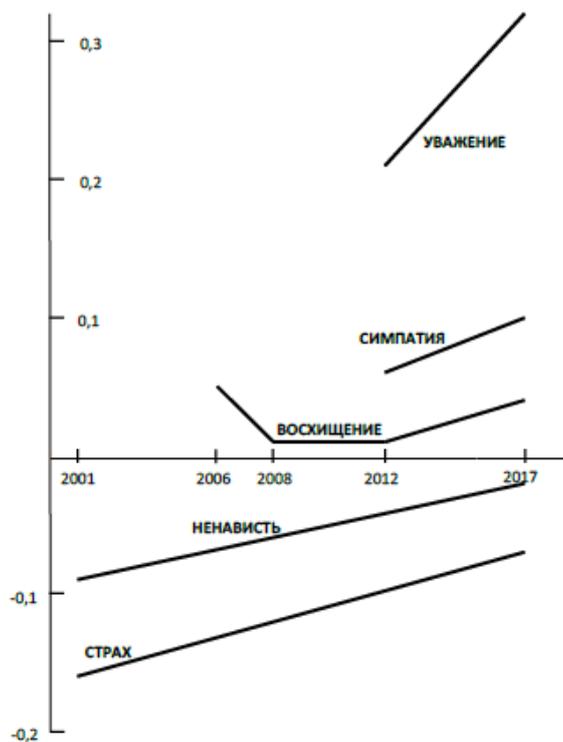


Рисунок 3. Результаты социологического исследования

3. В вузах нашей страны ведется подготовка бакалавров и магистров по направлению высшего профессионального образования «Конфликтология». Изданы учебники по дисциплине «Конфликтология: управление конфликтами». Любой конфликт начинается с расхождения во мнениях и переходит в стадию противостояния, противоборства, противодействия (вплоть до вооруженного). Управление конфликтами наиболее эффективно на стадии расхождения во мнениях. Известно (в изложении М.Ю. Лермонтова) к чему привел конфликт между общественным и личным мнениями:

«Не вынесла душа поэта  
 Позора мелочных обид,  
 Восстал он против мнений света  
 Один, как прежде... и убит!».

Через 4 года в результате межличностного конфликта с Н.С. Мартыновым погиб и сам поэт.

Неумение управлять конфликтами на стадии расхождения во мнениях, являющихся результатами измерений НМС, привело ко многим кровопролитным войнам и продолжает сказываться на методах борьбы с инакомыслием и терроризмом. Поэтому возможность измерений НМС нельзя недооценивать.

#### Литература

- 1 ГОСТ 16263-70 «ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. МЕТРОЛОГИЯ. Термины и определения».
- 2 Азгальдов Г. Г., Гличев А. В., Крапивенский З. Н., Кураченко Ю. П., Панов В. П., Фёдоров М. В., Шпекторов Д. М. Квалиметрия наука об измерении качества продукции // Журнал Стандарты и качество, № 1, 1968 г. С. 34-35.
- 3 Азгальдов Г.Г., Костин А.В. Метрология и квалиметрия: вопросы идентификации // Мир измерений, № 1, 2010.
- 4 Шишкин И.Ф. Основы метрологии, стандартизации и контроля качества: Учеб. пособие. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 320 с.
- 5 Шишкин И.Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством: Учебник для вузов/Под ред. акад. Н.С. Соломенко. – М.: Изд-во стандартов, 1990. 342 с.
- 6 Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 492 с.
- 7 Шишкин И.Ф., Станякин В.М. Квалиметрия и управление качеством: Учебник для вузов. – М.: Изд-во ВЗПИ, 1992. – 256 с.
- 8 Шишкин И.Ф. Измерения качества образования и образовательных услуг // Педагогические измерения, № 1, 2005. – С. 105-123.
- 9 Шишкин И.Ф. Экономическое управление качеством жилищно-коммунальных услуг // Электронный журнал «Экономика качества». URL: [www.eq-journal.ru](http://www.eq-journal.ru).–2015.–№2 (10).
- 10 Закон Российской Федерации от 27.04.1993 № 4871-1 «Об обеспечении единства измерений».
- 11 ГОСТ Р 8.000-2000 «ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. Основные положения».
- 12 Федеральный закон от 26.06 2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
- 13 Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Ч. 1. Общая теория измерений: Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во «Питер», 2010. – 192 с.
- 14 Дубровский Д.И. Гносеология субъективной реальности // Философские науки, № 4, 2011. С. 1-6.

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ КАК АКТУАЛЬНАЯ ЗАДАЧА МЕТРОЛОГИИ

К.В. Сапожникова<sup>1</sup>, Р.Е. Тайманов<sup>1</sup>, Ю.В. Бакшеева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева»

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

[k.v.s@vniim.ru](mailto:k.v.s@vniim.ru)

Актуальной метрологической задачей в эпоху Индустрии 4.0 является разработка методов и средств прогнозирования динамики процессов, проявления которых заметно через многие месяцы и годы. Эффективность таких разработок иллюстрирована примерами.

## 1. Введение

В развитии систем в биологии и технике есть общие закономерности.

В процессе эволюции животные приобретали способность адаптироваться к прогнозируемому изменению условий существования, ослабляя ожидаемые последствия нежелательных воздействий для популяции. Пример – суточные и сезонные изменения жизнедеятельности. В течение истории человечества потребность в прогнозировании возрастала, ее сфера и горизонт расширялись. В настоящее время остро ощущается потребность:

- диагностировать процессы износа компонентов технических средств и нештатные изменения условий их работы для предупреждения аварий и производственного брака;
- выявлять на ранних стадиях нежелательные изменения в физиологических системах человека, порождающие заболевания;
- прогнозировать динамику развития общества и идентифицировать в ней опасные тренды.

Речь идет о процессах, называемых далее медленными, последствия которых становятся заметными через многие месяцы и годы.

Со второй половины 20-го века быстро нарастает темп автоматизации в промышленности, на транспорте, в оборонной технике, коммунальном хозяйстве, быту, здравоохранении и т.д. Наступает новая, более высокая ступень развития автоматических систем управления (АСУ) – промышленная революция Индустрия 4.0 – с широким распространением роботов, Интернетом вещей, киберфизическими системами, «умными и безопасными» городами, «умным» здравоохранением, «умным» производством и т.д.

Поскольку работа АСУ опирается на информацию, поступающую от средств измерений (СИ), быстрое развитие автоматизации порождает

лавинообразный рост количества СИ и связанное с ним снижение субъективного контроля их метрологической исправности [1].

Потребность в автоматизации актуализируется в медицине применительно к диагностике заболеваний, что связано с относительно быстрым ростом продолжительности жизни и пенсионного возраста, а также с сопутствующим увеличением количества пациентов. Необходимость сокращения затрат на здравоохранение при увеличении нагрузки на врачей требует выявления заболеваний на возможно более ранней стадии, когда лечение более эффективно.

При сохранении практически неизменной метрологической надежности СИ растет опасность использования недостоверной измерительной информации, что повышает вероятность увеличения количества аварий и техногенных катастроф, трагических исходов в медицине и т.д. (Измерительную информацию трактуют как достоверную, если она является результатом измерений, погрешность которых находится в пределах, установленных в документации на методику выполнения измерений и/или на соответствующее СИ).

## **2. Прогнозирование развития медленных процессов**

### *2.1. Увеличение интервала между операциями метрологического обслуживания*

Традиционные методы метрологического обеспечения в период эксплуатации СИ не соответствуют требованиям Индустрии 4.0. По зарубежным данным, к концу межкалибровочного/межповерочного интервала (МКИ) длительностью 1-2 года у (10-15) % СИ погрешность превосходит допустимую [2], т.е. прогноз параметров процессов деградации во многих случаях недостоверен. С увеличением количества СИ пропорционально увеличивать количество метрологов, занимающихся периодической калибровкой/поверкой, экономически неприемлемо. Традиционные методы метрологического обеспечения СИ на этапе эксплуатации умирают, но потребность, которую они удовлетворяли, лишь обостряется.

В этой связи к числу наиболее актуальных задач метрологии технических систем в 21-ом веке относятся:

- увеличение МКИ СИ до срока службы, определяемого моральным старением;
- обеспечение достоверности измерительной информации в течение этого срока.

При назначении первичного МКИ прогноз деградационных процессов обычно строят, опираясь на информацию, перечисленную в [3, 4]. Однако эта информация нередко отсутствует или отличается

значительной неопределенностью. Как следствие, длительность МКИ редко устанавливается более 2-3 лет.

В действительности ситуация сложнее. В ряде случаев в процессе эксплуатации СИ возникают «скрытые» составляющие погрешности результатов измерений, которые не выявляются при традиционных операциях метрологического обслуживания [5]. Характерны следующие примеры [5]:

- неоднородность плотности металла опоры струнного силоизмерительного преобразователя, в результате чего при нагрузках, близких к предельным, меняется наклон его оси относительно направления силы, которая должна быть измерена [6];
- изменение свойств СИ при смене поставщика компонента;
- изменение магнитных свойств мишени вихретокового преобразователя в процессе эксплуатации;
- изменение диэлектрических свойств воздуха между электродами емкостного преобразователя, например, при непредусмотренном увеличении влажности;
- изменение свойств топлива, расход которого измеряется, из-за намеренного добавления в топливо воздуха и воды.

Для обоснования МКИ и устранения погрешности, связанной с влиянием названных выше и подобных им причин, помимо [3, 4], необходимо опереться на [5, 7]:

- анализ данных об опыте эксплуатации аналогов с акцентом на возможные изменения условий эксплуатации;
- изучение технологии изготовления СИ с целью выявления требований к компонентам и операциям, некачественное выполнение которых может привести к заметному росту погрешности в процессе эксплуатации СИ;
- разработку программы и проведение ускоренных испытаний СИ или его блоков и/или узлов;
- ранжирование составляющих погрешности по степени опасности в процессе эксплуатации СИ и определение среди них критических составляющих, рост которых лимитирует длительность МКИ.

Выявление критических составляющих погрешности в некоторых случаях позволяет принять меры к их уменьшению за счет:

- изменения конструкции и технологии;
- введения простого, но частого обслуживания;
- введения периодической упрощенной калибровки с помощью оператора, а по ее результатам – коррекции.

## *2.2. Метрологический самоконтроль СИ как метод автоматического контроля процесса деградации*

Конечно, не всегда выполненный прогноз изменения метрологических характеристик СИ дает основания назначить длительность МКИ не менее требуемой. Однако анализ динамики роста составляющих погрешности СИ дает возможность реализовать в СИ функцию метрологического самоконтроля. В большей части случаев эта функция позволяет автоматически оценивать рост уровня критической составляющей погрешности, осуществлять автоматическую коррекцию результатов измерений и многократно увеличивать МКИ. С учетом ГОСТ [8], СИ, включая датчики и измерительные системы с метрологическим самоконтролем, называются интеллектуальными. Они строятся на основе структурной, временной и/или информационной избыточности.

Например, в интеллектуальном СИ, предназначенном для определения положения штанги органа регулирования реактора ВВЭР-1000 [10], использована структурная и временная избыточность. Самоконтроль организован за счет:

- сравнения кода, поступающего от неподвижного набора катушек, находящегося внутри подвижной штанги, содержащей набор магнитных колец, с ожидаемым кодом штатной шкалы.
- сравнения количества поданных команд на перемещение и числа сделанных шагов;
- измерения сопротивления катушек на переменном и постоянном токе.

Идентификация положения штанги с допустимой точностью реализуется при обрыве любой катушки индуктивности или любого провода, а также при изменении сопротивления катушек из-за «старения» провода катушек и изменения температуры.

10-летняя эксплуатация нескольких таких СИ на Калининской АЭС показала, что с уверенностью можно прогнозировать их эффективную работу без метрологического обслуживания 60 лет и более.

В уровнемере с подобным типом шкалы, но упрощенного типа, на основе неподвижных герконов и подвижных магнитов, размещенных на поплавке, также организован метрологический самоконтроль. С учетом опыта эксплуатации для такого уровнемера обоснована длительность МКИ, равная восьми годам.

Еще один пример – многоканальная система, предназначенная для измерения силы, включающая струнные преобразователи [6]. Доминирующая составляющая погрешности, упомянутая выше, приводит к наклону преобразователя. Она зависит от угла между его осью и струной, увеличивается с ростом силы и практически может превысить допустимое значение погрешности. Метрологический самоконтроль, позволяющий

выявить наклон преобразователя, было предложено организовать на основе структурной избыточности путем использования дополнительной струны (при крестообразной компоновке с основной струной).

Во ВНИИМ накоплен опыт организации метрологического самоконтроля в СИ перемещения, уровня, солесодержания, давления, расхода, силы, температуры, удельной электрической проводимости жидкости, других неэлектрических величин.

Трудности внедрения отчасти объясняются законом Куна – сопротивлением метрологов ожидаемым последствиям использования интеллектуальных СИ – значительным сокращением оплачиваемых поверок и калибровок СИ на этапе эксплуатации. Тем не менее, количество публикаций по этой проблеме непрерывно растет. Разработками в области метрологического самоконтроля в России, помимо ВНИИМ, занимаются и в других городах, а также в Украине, Великобритании, США, Германии, Китае и других странах. Для облегчения применения метрологического самоконтроля во ВНИИМ разработаны и вступили в силу три ГОСТ [7-9]. Ряд нормативных документов выпущен и за рубежом.

### *2.3. Исследование процессов изменения физиологических систем*

Характерная черта медицины 21 века – поиск новых источников измерительной информации о состоянии здоровья, получаемой без участия медицинского персонала, в автоматическом режиме. В рамках этого поиска разрабатываются методы диагностирования заболеваний по мимике лица, пластике движений, кардиограммам, электро- и магнитоэнцефалограммам, звучанию голоса и т.д. Учитывая, что болезнь, характеризуется совокупностью параметров, ее удобно рассматривать как многопараметрическую величину.

Пример успешной работы в этом направлении – разработка диагностического аппарата на основе компьютеризованного кардиографа с расширенным диапазоном частот. С его помощью примерно за 10 минут оказывается возможным автоматически диагностировать более 40 заболеваний внутренних органов [11]. Набор особенностей кардиоциклов, идентифицирующих болезнь, определяется феноменологически [1], т.е. как набор, характерный для этого заболевания, диагностированного ранее классическими методами. Существенно, что диагноз определяется по результатам анализа примерно 600 циклов, а не за 5-10 циклов, как обычно.

Одно из наиболее актуальных направлений в формировании «умного здравоохранения» – разработка методов диагностирования отклонений в развитии мозга человека, причем как связанных с заболеваниями, так и с особой одаренностью, а также методов усиления влияния центральной нервной системы на сопротивляемость организма болезням. Особый

интерес в этой области представляет выявление отклонений на ранних стадиях развития мозга, когда оперативному дистанционному измерению доступны лишь мимика лица и пластика движений, а также предречевые вокализации ребенка: плач, «гуканье», «гуление» и т.д. Для исследования мозга в первые месяцы жизни младенцев метод измерения параметров вокализаций более эффективен.

В известных публикациях перечень информационных признаков, определяющих диагноз, формируется феноменологически на основании того факта, что именно эти признаки характерны для голосов младенцев, у которых соответствующий диагноз установлен. В числе основных информационных признаков – частота основного тона и ее статистические характеристики, форманты и их особенности, энергия в диапазоне частот до 1,0 кГц [12-14].

Однако на основании этих признаков удастся выявить лишь «грубые» нарушения сердечной деятельности, дыхания, работы мозга, anomalies кровообращения. Достоверность диагноза не превышает (60-70)%, что не позволяет вынести окончательное суждение о требуемом лечении. Перечисленные признаки существенно зависят от возраста ребенка, веса и причины плача; связь между изменением названных выше параметров спектра и определенными нейрофизиологическими отклонениями достоверно не установлена. В [15] предложено для диагностирования заболеваний мозга использовать дополнительные признаки, также обоснованные феноменологически (связь вдоха и выдоха с моментом возникновения плача, наличие модуляции звучания, наличие шумовых фрагментов в плаче, скрипучий характер плача и т.д.) Диагностирование по этим признакам предложено осуществлять путем их экспертной оценки, учитывая, по-видимому, нечеткость формализации.

Синтетический подход к модели измерения многопараметрической величины, разрабатываемый во ВНИИМ, предполагает ее создание как модели «механизма» формирования измеряемой величины [1].

Специалисты ВНИИМ с участием нейрофизиологов, психологов, математика-программиста и арт-терапевта разработали и обосновали синтетическую модель измерения эмоций, которые с наибольшей вероятностью возникают у человека после восприятия им определенных звучаний. В этой модели эмоция трактуется как обусловленная воздействием звучания нейрофизиологическая (эмоциогенная) реакция, характер которой можно идентифицировать по ощущению или поведению субъекта. Соответственно, разработанная модель отображает модель работы мозга при прослушивании акустического сигнала. В 1-ой ступени модели рождаются простейшие (наиболее древние, общие у животных и человека) эмоции, которые принято именовать базовыми (рис. 1). Они соответствуют базовым эмоциогенным реакциям, возникающим на

инфразвуковых частотах дельта-, тэта- и альфа-ритмов мозга. Эмоции более позднего происхождения, общие у всех людей и доступные развитым млекопитающим, формируются во 2-ой ступени модели из последовательностей базовых эмоций. В 3-й ступени последовательности базовых эмоциональных образов образуют культурно обусловленные эмоциональные образы [16].

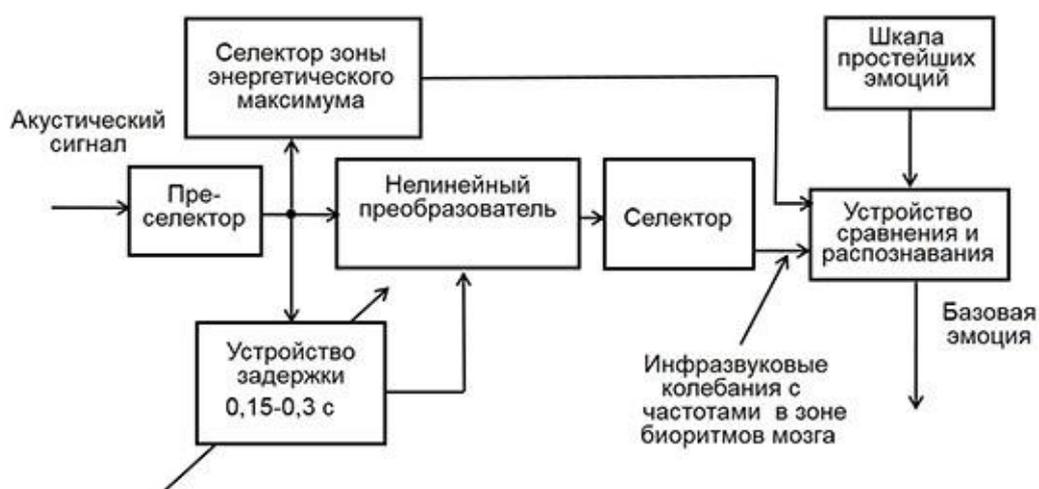


Рисунок 1. 1-я ступень модели измерения ожидаемых эмоций, вызванных акустическими сигналами

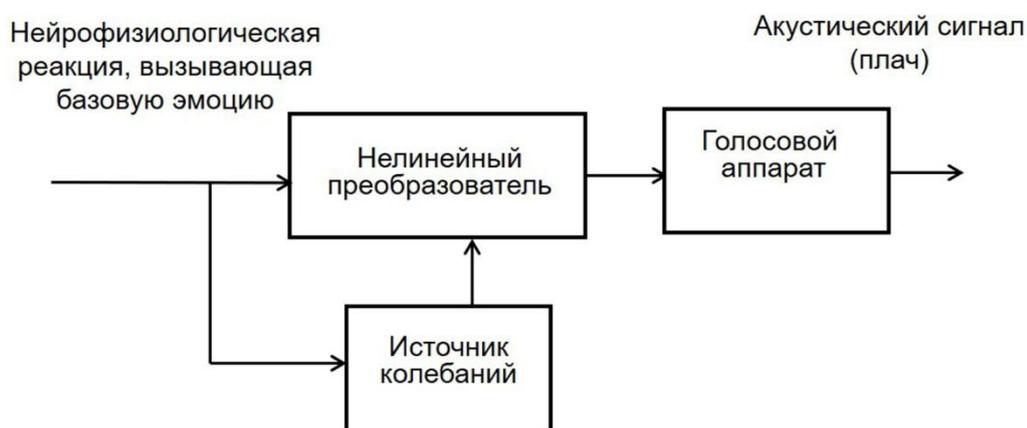


Рисунок 2. Модель механизма формирования эмоциональной окраски голоса

Анализ эволюции эмоций и процесса их рождения у человека в ответ на акустический стимул привел к представлению о том, что механизм работы мозга при формировании эмоциогенных реакций на акустические воздействия (рис. 1) и при окрашивании звучания голоса возникшей эмоцией (рис. 2), в основе, один и тот же, но его направленность различна. Рождающиеся в мозгу нейрофизиологические реакции (с частотами

дельта-, тэта- и альфа-ритмов мозга), вызвавшие базовые эмоции, воздействуют на нелинейный преобразователь и модулируют поступающие на него же колебания звуковой частоты.

Возникла гипотеза о возможности диагностировать уровень эмоционального развития младенцев и выявлять нейрофизиологические отклонения по результатам измерения параметров звучаний их голосов. Для этого следует нелинейно преобразовать вокализации и селектировать инфразвуковые колебания, а затем сравнить результаты с некоторой нормой – спектром инфразвуковых колебаний среднестатистического звучания однотипных и одинаково преобразованных вокализаций, записанных у представительной группы детей. С целью проверки гипотезы были проведены исследования изменений преобразованного спектра плача, записанного у нескольких девочек в возрасте 1-2 дня и 2 месяца. Результаты исследований показали, что за 2 месяца среднее значение относительного уровня мощности компонентов на частотах дельта-ритма снизилось с 47 до 38%, тэта-ритма возросло с 33 до 40 %, альфа-ритма увеличилось с 20 до 22 %.

Уменьшение мощности в зоне дельта-ритма можно рассматривать как свидетельство привыкания младенца к автономной жизни, а увеличение мощности в зоне тэта-ритма – как процесс осмысления окружающего мира. Небольшой рост активности в зоне альфа-ритма свидетельствует об увеличении доли осознанной моторики.

Характерно, что и в процессе эволюции развитие эмоций у животных было связано с последовательным усилением нейрофизиологической активности на все более высоких частотах [17]. Развитие младенца, по-видимому, повторяет путь эволюции.

СКО относительного уровня мощности биоритмов для группы младенцев и его изменение во времени характеризуют динамику развития индивидуальных особенностей эмоциональности младенцев в группе. За те же два месяца СКО относительного уровня мощности в зоне каждого из биоритмов для этой группы младенцев возросло примерно в два раза. Инициативный характер этих исследований, выполненных без привлечения каких-либо финансовых средств, крайне ограничил количество обследованных детей и лимитировал длительность интервала анализа. Однако даже тот небольшой объем данных, который удалось получить, свидетельствует о полезности предложенного метода. Периодическое измерение величин, характеризующих инфразвуковой спектр преобразованных вокализаций, позволяет оценить динамику эмоционального развития младенцев, выявить отклонения в развитии и прогнозировать их последствия, принять необходимые меры медицинского или образовательного характера.

### **3. Заключение**

В статье показано, что все большую актуальность приобретает разработка методов и средств измерений величин, характеризующих динамику медленно изменяющихся процессов. Такие измерения необходимы для прогнозирования состояния технических, биологических, экологических, социальных и некоторых других систем на заданном интервале времени. Эффективность разработки методов прогнозирования иллюстрирована конкретными примерами.

### **Благодарность**

Работа «Формирование измерительной модели, связывающей музыкальное воздействие с эмоциями слушателей» выполнена по гранту РФФИ № 15-04-00565 ОГОН.

### **Литература**

- 1 Тайманов Р.Е., Сапожникова К.В. Приборы. 2016, вып. 10 (208). С. 41-45.
- 2 Генкина Р.И., Лукашов Ю.Е. и др. Законодательная и прикладная метрология. 2010, вып. 5. С. 8-20.
- 3 OIML D 10. Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment used in testing laboratories.
- 4 РМГ 74-2004 ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.
- 5 Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R., Ionov A., Proc. 27-th International Symposium "Metrology and Metrology Assurance 2017", Sept. 8-12, 2017, Sozopol, Bulgaria. Pp.20-25.
- 6 Сапожникова К., Пронин А., Тайманов Р., Котляров Р., XXVI Национальный научный симпозиум с международным участием "Метрология и метрологическое обеспечение-2016", 7 - 11 сент., Созополь, Болгария. С.163-170.
- 7 ГОСТ Р 8.825-2013. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы ускоренных испытаний.
- 8 ГОСТ Р 8.734-2011. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
- 9 ГОСТ Р 8.673-2009. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
- 10 Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I. Nuclear Plant Journal. 2007, March-April. Pp. 45-47.

- 11 Успенский В.М. Информационная функция сердца, 2-ое дополн. издание. Под ред. В.Б. Симоненко. Москва, Планета, 2016.
- 12 Zanchi P., Fasolo M. et al. *Psicologia Clinica dello Sviluppo*. 2016, 20 (1). Pp. 103-123.
- 13 Orlandi S., Bandini A., Fiaschi, F.F., Manfredi, C. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2017, 37. Pp.16-22.
- 14 Rosales-Pérez A., Reyes-García C.A., et al. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2015, 17. Pp. 38-46.
- 15 Патент RU 2067420 С1. Серганова Т.И., Столярова Э.И. А61В 8/00 (1995.01), Конв. приоритет: 29.09.1993 RU 93 93046900
- 16 Taymanov R., Baksheeva Iu., Sapozhnikova K., Chunovkina A. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*, 772, Art. 012036, 6 p. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012036>
- 17 Taymanov R., Sapozhnikova K. *EPJ Web of Conferences*. 2014, 77, 00016 <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20147700016>

# МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Соколов Б.В.<sup>1,2</sup>, Бураков В.В.<sup>1</sup>, Микони С.В.<sup>1</sup>, Юсупов Р.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН)*

<sup>2</sup> *Университет ИТМО*

[sokolov\\_boris@inbox.ru](mailto:sokolov_boris@inbox.ru)

## **Введение**

В настоящее время проблемы, связанные с оценкой качества продукции, стали предметом интенсивных исследований, проводимых в такой новой научной отрасли знаний, как *качествоведение*, в которой разрабатываются методологические и методические основы количественного оценивания качества продукции, средства обеспечения единства форм оценивания указанного качества и достижения требуемой точности [1].

Центральным понятием здесь является понятие *качества* – под которым, согласно Международному стандарту ISO 8402-2000, понимается совокупность характеристик объекта, определяющих его способность удовлетворять установленным или предполагаемым потребностям [3,9,27-28]. В области создания и применения новых информационных технологий уже давно ведутся исследования, посвящённые оцениванию качества соответствующей продукции. Результаты указанных исследований находят своё отражение в соответствующих Международных стандартах и отечественных ГОСТах [1,3,9]. Так, например, в международном стандарте ISO 9126:1991 «Информационная технология. Оценка программного продукта. Характеристики качества и руководство по их применению» и последующих стандартах, его развивающих (ISO 9126:1-4, ISO 14598 – 1-6: 1998-2000), приводятся модели, показатели, критерии и метрики качества программных средств и продуктов [3,9]. При этом на практике используется большое число (порядка 100-150) количественных и качественных показателей, характеризующих как сами программные средства, так и технологии их создания. Среди них, в первую очередь, можно указать показатели стоимости создания и эксплуатации программных средств, критичность, оригинальность, размер и сложность программных средств; полнота описания требований, динамика и величина вносимых изменений; степень соответствия традиционной модели; напряженность графика создания программных средств, доступность ресурсов; доступность заказчика; число и квалификация разработчиков

программных средств. На рис.1. приведен пример задания частных показателей, а также единиц их измерений, используемых на практике при оценивании качества создаваемого программного обеспечения [3,27,28].

Кроме перечисленных показателей, к настоящему времени также разработано большое количество (порядка нескольких десятков) моделей создания программных средств, к числу которых можно отнести: классическую каскадную модель, каскадную модель с перекрывающимися процессами, V-образную модель каскадную модель и каскадно-возвратную модель, модель XP, эволюционное прототипирование, экспериментальное прототипирование, модель RAD, пошаговую модель, спиральную модель, сборочное программирование. В этих условиях особую актуальность приобретает проблема обоснованного выбора и адаптации соответствующей модели под проект конкретно создаваемого программного средства. Для этого разработано соответствующее методическое обеспечение, включающие в себя многочисленные методы, алгоритмы и процедуры многокритериального оценивания, анализа и выбора соответствующих моделей и проектов. Так, например, в работах [3,9] были разработаны методы и алгоритмы его реализующие, а также средства автоматизации решения задач формирования множества рекомендуемых моделей процесса разработки программных средств, принадлежащий классу алгоритмов распознавания, основанных на вычислении оценок. Особенности метода и алгоритмов являются использование множества рекомендуемых моделей в качестве конечного результата; использование редукции как способа формирования системы опорных множеств, гарантирующей формирование множества моделей; отказ от использования весовых коэффициентов, как средства выявления приоритетов лица, принимающего решение. Предложенные средства автоматизации в настоящее время используются в ряде отечественных и зарубежных компаний-разработчиков программного обеспечения

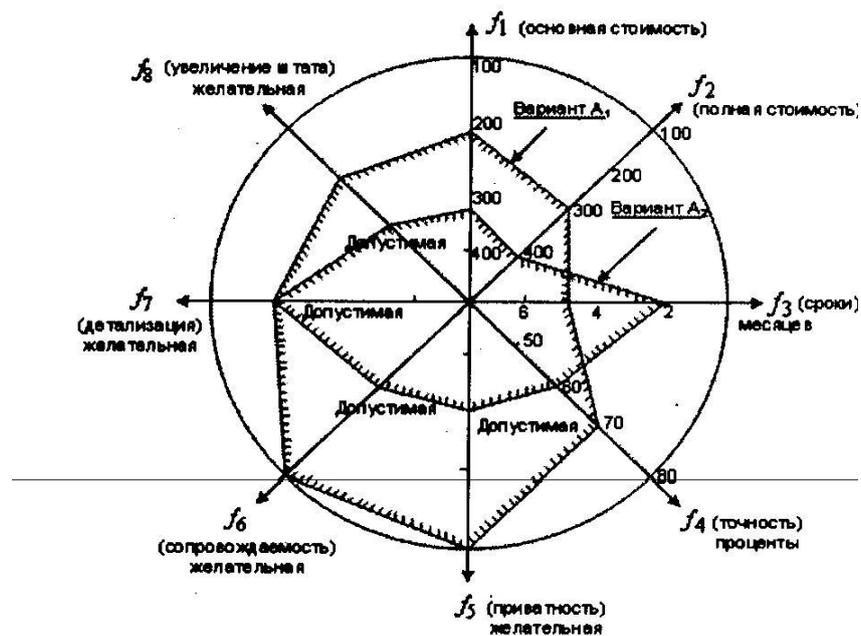


Рисунок 1. Пример набора показателей, используемых при оценивании качества программных средств.

В целом анализ полученных в данной области результатов показывает, что к настоящему времени для уровня машинной модели (программы) существуют методические средства, позволяющие оценивать её качество [3,9,27,28]. Поэтому в современных условиях становится актуальной разработка такого же рода средств оценивания качества моделей (методов, моделей, алгоритмов и методик), но теперь уже для более ранних этапов моделирования объектов-оригиналов, в качестве которых в данной статье рассматриваются сложные объекты или их частный случай – сложные технические объекты.

Следует отметить, что в области оценивания качества моделей к настоящему времени получено много интересных научных и практических результатов, связанных как с количественным и качественным оцениванием и анализом свойств моделей [6,12,22,23,26], так и упорядочением, а также выбором (синтезом) моделей для решения заданных классов задач [10,12,22,23]. При этом для различных предметных областей создавались свои теории и технологии моделирования, разрабатывались и разрабатываются огромное количество банков моделей и много модельных комплексов (далее моделей), которые широко используются на практике. Вместе с тем, при наличии большого разнообразия моделей остаются открытыми вопросы обоснованного выбора моделей, сравнения различных технологий моделирования [2,4,8,9,12,13,1517-25]. Это касается, в том числе, и такой важнейшей отрасли научных знаний как современная метрология [19]. Более того, в современных условиях назрела острая необходимость

создания таких информационных технологий, при которых уровни отчуждаемости моделей от своих разработчиков были бы такими же, как это имеет место для соответствующих программных продуктов [4,9].

Из анализа изложенного материала следует, что в современных условиях, к сожалению, практически остаётся не решённой проблема оценивания качества моделей, анализа и упорядочения различных классов моделей, обоснованного синтеза новых моделей, либо нахождения среди уже существующих моделей наиболее предпочтительных моделей, предназначенных для решения конкретных прикладных задач. Актуальность данной проблемы в ещё большей степени усиливается в том случае, когда исследуемый объект описывается не одной моделью, а комплексом моделей, в состав которого могут входить разнородные и комбинированные модели, каждая из которых должна оцениваться своей системой показателей [7,9]. Дополнительную сложность указанная проблема приобретает в том случае, когда при оценивании качества моделей приходится учитывать *фактор времени*. Это касается, прежде всего, тех объектов-оригиналов, у которых под действием различных причин (объективных, субъективных, внутренних, внешних и т.п.) наблюдается существенная структурная динамика [12,15]. В этих условиях для того, чтобы модель сохраняла свою точность и полезность, необходимо проводить адаптацию параметров и структур данной модели к изменяющимся условиям. А для этого заранее, на этапе синтеза модели, в состав её параметров и структур требуется вводить дополнительные элементы (избыточность), которые на этапе непосредственного использования модели позволят управлять качеством модели, снизят чувствительность модели и соответствующих показателей качества к изменениям состава, структуры и содержания исходных данных [12,22].

Однако для конструктивного решения общей проблемы оценивания и управления качеством моделей (выбора наиболее предпочтительных моделей), с нашей точки зрения, надо, в первую очередь, исследовать следующие общие и частные проблемы моделей [22,26]:

1. *Проблема разработки обобщённого описания различных классов моделей, позволяющего, во-первых, устанавливать взаимосвязи и соответствия между видами и родами моделей, и, во-вторых, сравнивать и упорядочивать их, используя различные метрики;*
2. *Проблема описания, классификации и выбора системы показателей, оценивающих качество моделей;*
3. *Проблема разработки комбинированных методов оценивания показателей качества моделей, заданных с использованием числовых и нечисловых (номинальных, порядковых) шкал;*

4. Проблема разработки методов и алгоритмов решения задач многокритериального анализа, упорядочения и выбора наиболее предпочтительных моделей, управления их качеством;
5. Проблема разработки методологических и методических основ решения задач многокритериального анализа и синтеза технологий комплексного моделирования сложных объектов.

Указанные проблемы и методические основы их формализации и решения, дополненные разработкой понятийно-терминологической и методологической базы, могут, с нашей точки зрения, рассматриваться как компоненты новой прикладной теории, которую будем называть квалиметрией моделей [22,26]. Рассмотрим более подробно вопросы обобщенного описывания проблематики моделей применительно к классу сложных объектов.

### **1. Обобщенное описание проблем субъектно-объектного моделирования развивающейся ситуацией и их управленческая интерпретация**

К настоящему моменту времени существуют многочисленные варианты определения понятия *модель*, которое характеризуется ярко выраженной *полисемией*, отражающей различные смысловые значения, вкладываемые в данное понятие в зависимости от сферы приложений и от контекста, в связи с которым оно используется. В настоящее время существует несколько сотен определений понятий *модель* и *моделирование* [2,6,10,11,12,14,17-20]. Приведём еще одно из них – *модель* – это системное многоместное отображение объекта оригинала, имеющее наряду с безусловно-истинным, условно-истинное и ложное содержание, проявляющееся и развивающееся в процессе его создания и практического использования [14]; *моделирование* – один из этапов познавательной деятельности субъекта, включающий в себя разработку модели, проведение на ней исследований, получение и анализ результатов, выдачу рекомендаций о дальнейшей деятельности субъекта и оценивание качества самой модели применительно к решаемой задаче с учётом конкретных условий.

Из анализа перечисленных определений следует, что всякая корректно построенная модель содержит объективную истину (т.е. в чём-то правильно отображает объект-оригинал) [14,15]. Вместе с тем, из-за конечного числа элементов и их отношений в создаваемых моделях, описывающих объекты, принадлежащие разнообразной действительности, и ограниченности ресурсов (временных, денежных, материальных), выделяемых на моделирование, модели всегда упрощённо и приближённо отображают объект-оригинал. Однако человеческая практика свидетельствует, что данные свойства модели являются вполне приемлемыми при решении задач, стоящих перед субъектами. Базируясь

на принципе баланса точностей всегда можно найти компромисс между степенью детализации описания объекта-оригинала и прагматической ценностью создаваемой модели.

Анализ вышеизложенных определений показывает, что при моделировании различных классов сложных объектов, естественных и искусственных, целесообразно выделять следующие основные элементы и отношения, характеризующие данный процесс: во-первых, субъекта либо субъектов ( $S_{<>}^m$ ), объект-оригинал ( $Ob_{<>}^{op}$ ), объект-модель ( $Ob_{<>}^m$ ), а также среду ( $CP_{<>}^m$ ), в которой осуществляется моделирование; и, во-вторых, бинарные отношения между перечисленными элементами  $R_{<1>}(Ob_{<>}^{op}, S_{<>}^m)$ ,  $R_{<2>}(S_{<>}^m, Ob_{<>}^m)$ ,  $R_{<3>}(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$ ,  $R_{<4>}(CP_{<>}^m, Ob_{<>}^{op})$ ,  $R_{<5>}(CP_{<>}^m, Ob_{<>}^m)$ ,  $R_{<6>}(CP_{<>}^m, S_{<>}^m)$ . Нижние индексы  $< >$  в перечисленных условных обозначениях означают собственные имена объектов (субъектов) и отношений [12,15,22]. Сразу же отметим, что, говоря в дальнейшем о субъектах моделирования, мы будем под этим термином понимать различные классы социальных субъектов, к числу которых могут быть отнесены: лица, принимающие решения (ЛПР); лица, обосновывающие решения (ЛОР); эксперты; лица, использующие модели; лица, строящие модели. На рис. 2. представлен возможный вариант взаимосвязи перечисленных элементов и отношений между ними [12,15].

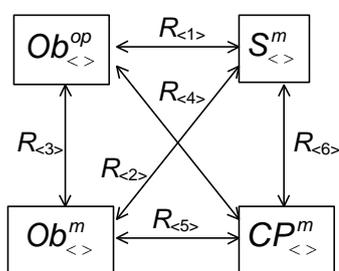


Рисунок 2. Варианты взаимосвязи объектов и субъектов моделирования развивающейся ситуации.

Из анализа данного рисунка следует, что процесс моделирования, определяется процессами взаимодействия субъектов ( $S_{<>}^m$ ), объект-оригинала ( $Ob_{<>}^{op}$ ), объект-модели ( $Ob_{<>}^m$ ), среды ( $CP_{<>}^m$ ), которые конструктивно задаются с помощью бинарных отношений между перечисленными элементами  $R_{<1>}(Ob_{<>}^{op}, S_{<>}^m)$ ;  $R_{<2>}(S_{<>}^m, Ob_{<>}^m)$ ;  $R_{<3>}(Ob_{<>}^{op}, Ob_{<>}^m)$ ;  $R_{<4>}(CP_{<>}^m, Ob_{<>}^{op})$ ;  $R_{<5>}(CP_{<>}^m, Ob_{<>}^m)$ ;  $R_{<6>}(CP_{<>}^m, S_{<>}^m)$ . Важно отметить, что все перечисленные элементы и отношения под действием объективных-субъективных, внешних-внутренних причин постоянно изменяются во времени. В этом случае мгновенно зафиксированное

структурное состояние рассматриваемой четверки назовем *ситуацией*, а ее изменение во времени – *развивающейся ситуацией*. При таком описании процесс моделирования сложных объектов можно интерпретировать как *управление развивающейся ситуацией*.

Цель такого процесса будет состоять в постоянной минимизации субъектом “невязки” возникающей между объектом-оригиналом и моделью на всех этапах их жизненного цикла путем постоянной адаптации модели под изменения, происходящие как в  $Ob_{<>}^{op}$ , так и  $CP_{<>}^m$ ,  $S_{<>}^m$ , например, изменение субъектом целей функционирования и моделирования  $Ob_{<>}^{op}$ .

Представленная трактовка процесса разработки модели объекта в контексте развивающейся ситуации является весьма перспективной. Такой подход позволяет использовать достаточно хорошо разработанный аппарат анализа и синтеза сложных технических систем и их систем управления применительно к таким объектам управления как модели, а также в целом, к развивающейся ситуации [12,15,22].

Соответствующая технология графически представлена на рис. 3, где приняты следующие условные обозначения: 1 – формирование субъектом  $S_{<>}^m$  целей создания объекта оригинала  $Ob_{<>}^{op}$ ; 2 – формирование сценариев управляющих и возмущающих воздействий на объект-оригинал реальный, либо виртуальный; 3 – формирование субъектом  $S_{<>}^m$  целей моделирования развивающейся ситуации; 4 – моделируемая система (объект  $Ob_{<>}^{op}$ ); 5 – модели ( $Ob_{<\theta>}^m$ ) исследуемой системы; 6 – оценивание показателей качества моделей; 7 – управление качеством моделей; 8 – управление параметрами моделей; 9 – управление структурами моделей; 10 – изменение концепции описания моделей, состоящее в изменении границ между объектом-оригиналом и воздействующей на него средой.

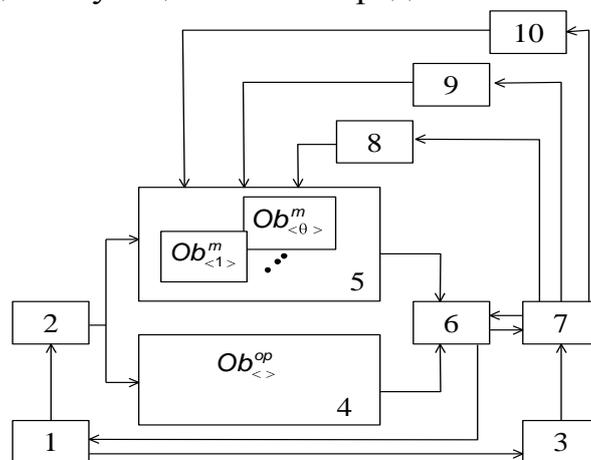


Рисунок 3. Обобщённая технология моделирования развивающейся ситуацией при ее управленческой интерпретации.

Из анализа данного рисунка следует, что моделирование развивающейся ситуации можно интерпретировать как процесс, состоящий в управлении качеством соответствующих моделей и самой технологии системного моделирования.

К настоящему времени разработаны многочисленные конструктивные подходы, позволяющие обобщенно описывать различные виды моделей, что необходимо для их оценивания и сравнительного анализа [12,15,22]. Теперь необходимо с таких же общих позиций содержательно и формально описать возможные технологии субъектно-объектного моделирования, опираясь на предлагаемую управленческую интерпретацию.

На содержательном уровне проблема моделирования развивающейся ситуации на различных этапах её жизненного цикла сводится к решению следующих трёх основных классов задач:

- задачи анализа структурной динамики развивающейся ситуации;
- задачи оценивания структурных состояний и структурной динамики развивающейся ситуации;
- задачи структурно-функционального синтеза модели, а также выбора оптимальных программ управления качеством моделей в различных условиях обстановки.

В данной статье уделим основное внимание этапу применения синтезируемых моделей по целевому назначению. Для указанного этапа на содержательном уровне сформулируем соответствующие задачи, связанные с проблемами моделирования развивающейся ситуации.

В этом случае задачи анализа структурной динамики моделирования развивающейся ситуации включают в себя три основных подкласса задач [12,22,23]:

- задачи структурного анализа развивающейся ситуации;
- задачи исследования структурной динамики развивающейся ситуации в условиях отсутствия входных воздействий;
- задачи исследования структурной динамики развивающейся ситуации при наличии входных воздействиях.

*На содержательном уровне суть рассматриваемых задач сводится к следующему:* известно исходное структурное состояние развивающейся ситуации; известен состав и допустимые варианты ее структурного построения; варианты сценариев изменения входных воздействий, известны пространственно-временные, технические и технологические ограничения; задан интервал времени, на котором проводится анализ; определён перечень показателей, с помощью которых оцениваются различные аспекты структурной динамики например, такие показатели качества моделей – как их адекватность, структурная и функциональная сложность, адаптивность, надежность и т.п..

Требуется провести многокритериальное оценивание и анализ структурной динамики развивающейся ситуации при различных вариантах входных воздействий. В том числе в ходе указанного анализа необходимо:

- выяснить существование приемлемых решений;
- оценить управляемость ситуации, чувствительность решений к изменению исходных данных;

Затем необходимо осуществить многокритериальный динамический структурно-функциональный синтез как самой модели, исходя из поставленных субъектом целей моделирования и используемых показателей его качества, так и соответствующей технологии системного моделирования, при которых для каждого заданного сценария изменения возмущающих воздействий на развивающуюся ситуацию обеспечивался бы ее наиболее предпочтительный переход в требуемое структурное состояние.

Проведем формализацию рассматриваемых задач с использованием развиваемой авторами теории управления структурной динамикой [12,21]. Для конструктивного описания связей перечисленных ранее субъектов и объектов, являющихся базовыми компонентами развивающейся ситуации, введём в рассмотрение динамический системный альтернативный мультиграф (ДСАМ) с перестраиваемыми структурами следующего вида:

$$G_{\chi}^t = \langle X_{\chi}^t, F_{\chi}^t, Z_{\chi}^t \rangle, \quad (1)$$

где  $\chi$  - индекс, характеризующий базовые компоненты развивающейся ситуации,  $\chi \in NS = \{1,2,3,4\}$  – множество индексов, соответствующих структурам  $Ob_{<\chi>}^{op}$ ,  $Ob_{<\chi>}^m$ ,  $S_{<\chi>}^m$ ,  $CP_{<\chi>}^m$ ,  $t \in T$  – множество моментов времени;  $X_{\chi}^t = \{x_{\chi l}^t, l \in L_{\chi}\}$  – множество базовых компонентов, входящих в состав структуры  $G_{\chi}^t$  в момент времени  $t$ ;  $F_{\chi}^t = \{f_{<\chi, l, l'>}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$  – множество дуг типа  $G_{\chi}^t$ , отражающих взаимосвязи между его базовыми компонентами в момент времени  $t$ ;  $Z_{\chi}^t = \{z_{<\chi, l, l'>}^t, l, l' \in L_{\chi}\}$  – множество значений параметров, количественно характеризующих взаимосвязь соответствующих базовых компонентов например, параметры материальных, энергетических и информационных потоков, циркулирующих между базовыми компонентами.

Кроме того, зададим множество допустимых, исходя из содержательной постановки каждой конкретной задачи и сценария моделирования развивающейся ситуации, операций отображения указанных выше структур друг на друга:

$$M_{<\chi, \chi'>}^t : F_{\chi}^t \rightarrow F_{\chi'}^t, \quad (2)$$

а также операций композиции указанных отображений в момент времени  $t$ :

$$M^t_{\langle \chi, \chi' \rangle} = M^t_{\langle \chi, \chi_1 \rangle} \circ M^t_{\langle \chi_1, \chi_2 \rangle} \circ \dots \circ M^t_{\langle \chi', \chi' \rangle}. \quad (3)$$

С учётом вышеизложенного, структурное состояние развивающейся ситуации можно определить как подмножество декартова произведения множеств ее базовых компонентов, на которых строятся возможные сценарии их взаимодействия:

$$S_\delta \subseteq X_1^t \times X_2^t \times X_3^t \times X_4^t, \quad \delta = 1, \dots, K_\Delta \quad (4)$$

В этом случае множество структурных состояний запишется следующим образом:

$$S = \{S_\delta\} = \{S_1, \dots, S_{K_\Delta}\}. \quad (5)$$

Введём ещё множество допустимых операций отображения структурных состояний развивающейся ситуации друг на друга:

$$\Pi^t_{\langle \delta, \delta' \rangle} : S_\delta \rightarrow S_{\delta'}. \quad (6)$$

При этом предполагается, что каждое структурное состояние развивающейся ситуации в момент времени  $t \in T$  задаётся в результате операции композиции уравнений, описывающих каждый тип структуры (см. формулу 3).

*Графическая управленческая интерпретация* рассматриваемых задач управления структурной динамикой в этом случае сводится к поиску такого структурного состояния  $S_\delta^* \in \{S_1, S_2, \dots, S_{K_\Delta}\}$  и такой последовательности выполнения операций отображения вида (6) во времени  $\Pi^t_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle} \circ \Pi^t_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle} \circ \Pi^t_{\langle \delta', \delta \rangle}$ , при которых обеспечивается переход динамических систем вида (1) из заданных в требуемые структурные состояния. Наряду с графической интерпретацией исследуемой проблемы может быть также предложено следующее ее *теоретико-множественное описание*: необходимо разработать принципы, подходы, модели, методы, алгоритмы, позволяющие находить такие  $\langle U^t, S_\delta^{*t} \rangle$ , при которых выполняются следующие условия

$$J_\theta \left( \left\langle \chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t \right\rangle, t \in (t_0, t_f] \right) \xrightarrow{\text{extr}}_{\langle U^t, S_\delta^{*t} \rangle \in \Delta_g} \quad (7)$$

$$\Delta_g = \left\{ \langle U^t, S_\delta^{*t} \rangle \mid R_\beta \left( \left\langle \chi^t, \Gamma_\chi^t, Z_\chi^t, F_{\langle \chi, \chi' \rangle}^t, \Pi_{\langle \delta, \delta' \rangle}^t \right\rangle \right) \in \tilde{R}_g; U^t = \Pi_{\langle \delta_1, \delta_2 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta_2, \delta_3 \rangle}^t \circ \Pi_{\langle \delta', \delta \rangle}^t; \beta \in \mathbf{B} \right\}, \quad (8)$$

где  $U^t$  – управляющие воздействия, позволяющие синтезировать как наиболее предпочтительную структуру и параметры модели, так и соответствующие технологии системного моделирования;  $J_\theta$  – стоимостные, временные, ресурсные показатели, характеризующие качество выбираемых моделей и технологий,  $q \in Q = \{1, \dots, l\}$  – множество номеров показателей;  $\Delta_g$  – множество динамических альтернатив;  $\mathbf{B}$  – множество номеров пространственно-временных, технических и

технологических ограничений, определяющих процессы реализации системного моделирования развивающейся ситуации;  $\tilde{R}_g$  – заданные величины;  $T = (t_0, t_f]$  – интервал времени, на котором синтезируются как наиболее предпочтительная структура модели, так и соответствующие технологии.

Анализ показывает, что предложенная интерпретация процессов управления структурной динамикой базируется на фундаментальном **функционально-структурном подходе** к описанию объектов любой природы [2,6,12]. Этот подход, в общем случае, представляет собой совокупность философских концепций, объективных закономерностей развития систем, научных положений и выводов, определяющих стратегию и методы анализа и синтеза антропогенных систем.

Его характерными особенностями являются [2,6,12,14]: учёт диалектической взаимосвязи функций и структуры объектов при определяющей роли функции по отношению к структуре; целостный подход к анализу и синтезу многоуровневых систем; учёт вещественно-энергетических и информационных связей между элементами системы; учёт взаимосвязей исследуемой системы с внешней средой.

Взаимоотношения функций и структур основных компонент развивающейся ситуации в процессе её изменения под действием различных причин характеризуются не только единством, но и противоречиями между ними. При этом разрешение указанных противоречий может осуществляться различными альтернативными путями – от полного отказа от старой структуры, переставшей соответствовать новым функциям, до использования старой структуры, несмотря на существенно изменившиеся функции. Предлагаемая интерпретация субъектно-объектного моделирования как процесса управления структурной динамикой, в этом случае предназначена для целенаправленного формирования оптимальной последовательности действий, которая должна обеспечить наилучшее разрешение (с точки зрения лица, принимающего решение) диалектического противоречия между функциями и структурами развивающейся ситуации на каждом из этапов ее жизненного цикла.

При этом на ранних этапах должны быть синтезированы такие взаимосвязанные множества функций и структур, а также внесён такой уровень избыточности в указанные множества и отношения, при которых на этапе применения объекта-оригинала и его модели по целевому назначению имелась бы возможность гибко реагировать на все расчётные и нерасчётные нештатные ситуации, вызывающие деградацию и реконфигурацию их структур.

## 2. Пример решения задачи оценивания и выбора проекта по трудоёмкости изготовления

### *Постановка задачи*

Приведем пример поставки задачи разработки модели сложного объекта, ориентированного на решение важного класса прикладных задач, связанного с многопараметрическими измерениями его свойств [19]. Будем предполагать, что для решения проблемы предложено два проекта. Составлены технические задания на их разработку. Функциональность моделей одинакова, т.е. они в равной мере адекватны решаемой задаче. Доказана соизмеримая достоверность результатов решения задачи. Каждый разработчик обосновывает предпочтительность своего проекта создания модели. Перед лицом, принимающим решение, возникла проблема выбора наиболее приемлемой модели. Его интересуют, прежде всего, временные затраты на проектирование и применение модели [10]. С учётом особенности разработки информационных продуктов предполагается, что финансовые затраты пропорциональны количеству разработчиков и времени выполнения этих этапов.

### *Исходные данные*

Разработчики моделей представили свои оценки временных затрат по пяти этапам проектирования и применения модели (см. табл. 1).

Этап проектирования представлен в табл. 1 двумя этапами: разработкой и модификацией модели, а этап применения – тремя этапами: настройкой модели на задачу, решением задачи и анализом результатов.

Таблица 1 – Временные оценки этапов жизненного цикла

Модель	Разработка, месяц	Модификация, недель	Настройка, часов	Решение, мин	Анализ, дней
№ 1	2	2	5	8	1
№ 2	3	1	3	6	2

### *Решение задачи*

Примем каждый этап за показатель оценивания предложенных проектов. Согласно требованиям задачи, каждый из них подлежит минимизации. Из сравнения векторных оценок двух моделей следует, что они несравнимы и требуется дополнительная информация для выявления лучшего варианта.

Учитывая численный характер векторных оценок, воспользуемся методами функционального выбора. Из них простейшим является метод достижения идеальной цели со средневзвешенной аддитивной обобщающей функцией:

$$v_i^a = \varphi_a(\mathbf{v}_i) = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij} \quad (9)$$

В формуле (9) переменная  $v_{ij}$  означает нормированную оценку значения  $j$ -го показателя  $i$ -го объекта, а  $w_j$  характеризует важность (вес)  $j$ -го показателя, причём:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (10)$$

Согласно формуле (9) метод требует задания важности признаков  $w_j$ ,  $j=1,2,3,4,5$ , по которым оцениваются модели. Вычислим весовые коэффициенты этапов жизненного цикла моделей с помощью матрицы парных сравнений. Для этого достаточно задать  $N - 1$  предпочтений, соответствующих гамильтонову пути в матрице размерностью  $N \times N$ . Остальные клетки матрицы достраиваются автоматически с сохранением коэффициента согласованности [16].

При задании предпочтений следует, прежде всего, определиться в соотношении этапов проектирования и применения модели. В случае многократного решения типовой задачи наиболее важными этапами являются настройка модели на задачу и время её решения. В этап настройки модели входит планирование и подготовка исходных данных. При разовом решении задачи наиболее важным считается этап проектирования модели.

Из возможных типов предпочтений применим кратность предпочтений [7,8,16]. Сформулируем следующие предпочтения, для простоты ограничившись только умеренным превосходством:

- умеренное превосходство (Разработка, Модификация);
- умеренное превосходство (Настройка, Модификация);
- умеренное превосходство (Решение, Настройка);
- умеренное превосходство (Решение, Анализ).

Умеренное превосходство по Т. Саати кодируется как отношение 3:1 [16], что означает трехкратное превосходство первого аргумента предпочтения над вторым. Ниже представлена матрица, соответствующая принятым предпочтениям. Введённые в 4 клетки предпочтения выделены полужирным шрифтом. На их основе вычислены значения в остальных клетках матрицы [10].

Этап	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Вес
Разработка		<b>3,00</b>	1,00	0,33	1,00	0,16
Модификация	0,33		0,33	0,11	0,33	0,05
Настройка	1,00	<b>3,00</b>		0,33	1,00	0,16
Решение	2,99	8,98	<b>3,00</b>		<b>3,00</b>	0,47
Анализ	1,00	2,99	1,00	0,33		0,16

На основе содержимого матрицы вычислен вектор весовых коэффициентов:  $w = (0,16; 0,05; 0,16; 0,47; 0,16)$ .

Выполнение этапов проектирования и применения моделей представлено в табл. 1 в различных единицах измерения. В то время как разработка модели измеряется месяцами, решение задачи измеряется минутами и т. д. Для сопоставления различных показателей они должны быть выражены в относительных единицах измерения, что достигается их нормированием. Нормированная оценка показателя в формуле (9) представляет собой отношение значения показателя к диапазону измеряющей его шкалы.

Граничные значения шкалы определяются либо по выборке оцениваемых объектов (выборочная шкала), либо задаются экспертом (экспертная или теоретическая шкала). Оценивание в экспертной шкале устойчиво, поскольку она учитывает возможный размах выборок. В левой части табл. 2 приведены границы выборочных шкал показателей для выборки из двух оцениваемых моделей.

Таблица 2 – Шкалы и предпочтения

Признак	Мин.зн.	Макс.зн.	Вес	Требование	Нижняя граница	Верхняя граница
Разработка	2	3	0,16	Мин	0	5
Модификация	1	2	0,05	Мин	0	3
Настройка	3	5	0,16	Мин	0	8
Решение	6	8	0,47	Мин	0	10
Анализ	1	2	0,16	Мин	0	3

В правой части таблицы приведены экспертные шкалы этих показателей. Два средних столбца табл. 2 содержат соответственно вектор важности (вес) показателей и предъявляемые к ним требования.

Нормированные в экспертных шкалах значения показателей представляют собой сопоставимые в абсолютной шкале [0, 1] единичные оценки моделей. Они приведены в соответствующих столбцах табл. 3.

Таблица 3 – Единичные и обобщённые оценки моделей

Модель	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Оценка	Ранг
№ 1	0,60	0,33	0,38	0,20	0,67	0,37	2
№ 2	0,40	0,67	0,63	0,40	0,33	0,44	1

В столбце «Оценка» приведены обобщённые оценки моделей 1 и 2, вычисленные по формуле (9), а в столбце «Ранг» – ранг, определённый по обобщённым оценкам. Согласно этим столбцам предпочтение отдаётся модели № 2.

Согласно требованиям в таблице 2 идеальными частными целями являются левые (минимальные) границы выборочных шкал. Относительные отклонения (нормированные значения штрафов) от этих границ представлены в соответствующих столбцах табл. 4.

Таблица 4 – Решение задачи методом отклонений от цели

Модель	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Отклонение	Ранг
№ 1	0,00	0,50	0,40	0,50	0,00	0,324	2
№ 2	0,33	0,00	0,00	0,00	0,50	0,133	1

Модель № 1 и № 2 имеют соответственно 2 и 3 нулевых штрафа по тем критериям, чьи значения совпадают с минимальными границами выборочных шкал. В столбце отклонение (от цели) приведены средневзвешенные штрафы по всем критериям. Поскольку у модели № 2 он меньше, она признаётся лучшей.

Таким образом, применение методов достижения цели и отклонения от цели дали одинаковые результаты, несмотря на различные относительные единичные оценки показателей и благодаря применению аддитивной средневзвешенной обобщающей функции обоими методами.

В том случае, когда лицо, принимающее решение, обладает большей информацией о целях и предпочтениях на шкалах показателей применяются соответственно методы оптимизации по достижению реальной цели и многомерной полезности. В примере совместим эти методы, задавшись реальными целями по четырём показателям и нисходящей логистической функцией полезности по показателю «Решение задачи».

На рис. 4 реальные цели помечены на оси абсцисс каждого из четырёх показателей. Установим 50-ти процентную полезность в точках достижения реальной цели. Ей соответствуют кусочно-линейные функции полезности. На графиках функций полезности точками показаны значения полезности для моделей № 1 и № 2. Модель № 1 определена левой колонкой графиков, а модель № 2 – правой колонкой.

Справа от каждой колонки графиков функций полезности показаны диаграммы вкладов соответствующих показателей в обобщённую оценку модели. Сектор круговой диаграммы представляет собой нормированное обобщённой оценкой слагаемое формулы (9). Ограниченный линиями сектор соответствует среднеарифметической оценке вклада по каждому показателю.

Решение задачи методом оптимизации по полезности с аддитивной обобщающей функцией приведено в табл. 5.

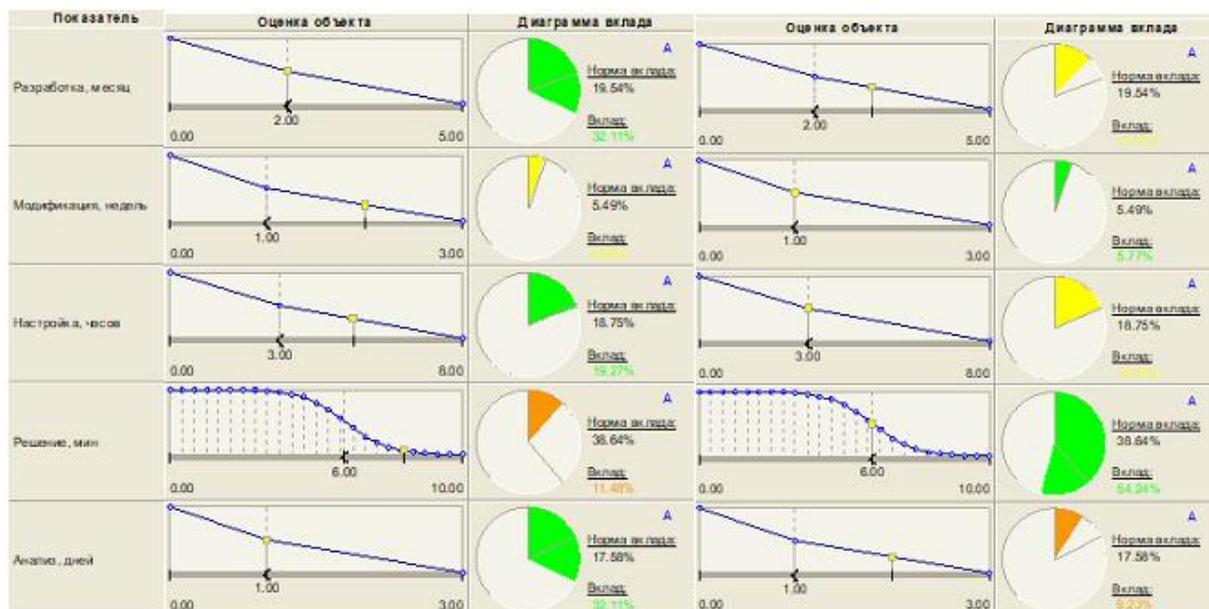


Рисунок 4. Значения функций полезности для моделей № 1 и № 2 и вклады оценок

Анализ вкладов на рис. 4 позволяет графически объяснить лучшую оценку модели № 2. Она достигнута за счёт вклада по показателю «Решение задачи», имеющему максимальную важность по сравнению с остальными показателями.

Таблица 5 – Решение задачи методом многомерной теории полезности

Модель	Разработка	Модификация	Настройка	Решение	Анализ	Оценка	Ранг
№ 1	0,67	0,50	0,50	0,06	0,75	0,36	2
№ 2	0,50	0,75	0,70	0,50	0,50	0,54	1

Рассмотренный пример позволил продемонстрировать основные методы функционального выбора. Одинаковые результаты, полученные этими методами для конкретного примера, можно рассматривать как частный случай. В общем случае для других объектов и предъявляемых к ним требований методы могут давать различные предпочтения на множестве оцениваемых объектов.

### Заключение

Подводя краткий итог сказанному, следует отметить, что в современных условиях назрела острая необходимость разработки методологических и методических основ теории оценивания и управления качеством моделей, являющейся одной из базовых теорий современной междисциплинарной отрасли системных знаний. Одна из основных целей

данной теории состоит в количественном и качественном оценивании таких базовых свойств моделей сложных объектов и процессов как адекватность, сложность, адаптивность, универсальность, многофункциональность, надежность, открытость, интеллектуальность, трудоемкость, достоверность.

Данная теория, являющаяся составной частью такой научной отрасли знаний как качествоведение, сама может быть декомпозирована на множество частных прикладных теорий, в которых должно проводиться оценивание качества моделей, используемых в определённой предметной области.

По нашему мнению, разработка теории качества моделей должна идти параллельно в двух основных взаимодействующих и взаимно обогащающих направлениях исследований. В рамках первого направления должны разрабатываться общие вопросы моделей, которые базируются на результатах, получаемых в рамках большого числа частных прикладных теорий оценивания и управления качеством моделей (второе направление исследований), развиваемых в каждой из конкретных предметных областей [3,6,9,12,13,17-25,27-28]. В качестве самостоятельного направления исследований по рассматриваемой проблематике целесообразно выделить создание интегрированных систем поддержки принятия решений при оценивании и управлении качеством моделей.

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПб ГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074-U01), Программы НТС Союзного государства «Мониторинг-СГ» (проект 1.4.1-1), грантов РФФИ (№№15-07-08391, 15-08-08459, 16-07-00779, 16-08-00510, 16-08-01277, 16-29-09482-офи-м, 17-08-00797, 17-06-00108, 17-01-00139), госзадания Министерства образования и науки РФ №2.3135.2017/4.6, в рамках бюджетных тем №№0073–2014–0009, 0073–2015–0007, Международного проекта ERASMUS +, Capacity building in higher education, № 73751-EPP-1-2016-1-DE-EPPKA2-CBHE-JP.

## Литература

- 1 Андрианов Ю.М., Суббето А. И. Квалиметрия в приборостроении. – Л. Машиностроение, 1990. – 216.
- 2 Балашов Е.П. Эволюционный синтез систем. – М.: Радио и связь, 1985. – 328 с.
- 3 Баранов С.Н., Домарацкий А.Н., Ласточкин Н.К., Морозов В.П. Процесс разработки программных изделий – М.: Наука, 2000. – 176 с.

- 4 Валькман Ю.Р. О проблеме “отчуждения” моделей исследуемых объектов от создателей в проектировании сложных изделий // Теория и системы управления -1996.-№3.
- 5 Калинин В.Н, Соколов Б.В. Многомодельный подход к описанию процессов управления космическими средствами //Теория и системы управления.-.1995.-№1.
- 6 Калинин В.Н., Резников Б.А. Теория систем и управления (структурно-математический подход). – Л.: ВИКИ, 1987
- 7 Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. – М.: Радио и связь, 1981.
- 8 Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений. – М.: Логос, 2000.
- 9 Липаев В.В. Тестирование компонентов и комплексов программ: учебник. РАН. Институт системного программирования. – М.: Синтег, 2010. – 392 с.
- 10 Микони С.В. Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив. Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 4(41). С. 180-199.
- 11 Нечёткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1986.
- 12 Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
- 13 Павловский Ю.А. Имитационные модели и системы. – М.: Фазис, 2000.
- 14 Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. – М.: Высшая школа, 1989.
- 15 Ростовцев Ю.Г., Юсупов Р.М. Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования// Известия ВУЗов. Приборостроение. - № 7, 1991.
- 16 Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. — М.: Радио и связь, 1989. — 316 с.
- 17 Савин Г.И. Системное моделирование сложных процессов. – М.:Фазис, 2000.
- 18 Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. – М.: Физматлит, 2001.
- 19 Сапожникова К.В., Тайманов Р.Е. Измерения как основа формирования новых знаний. /В книге Метрология и измерительная техника, книга-справочник в трех томах, ред. проф. Х. Радева, т.3, перевод с болгарского М.Иговой и К. Коджабашевой, Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2016, с.749-780.

- 20 Скурихин В.И., Забродский В.А., Копейченко Ю.В. Адаптивные системы управления машиностроительным производством. – М.: Машиностроение, 1989.
- 21 Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Комплексное моделирование функционирования автоматизированной системы управления навигационными космическими аппаратами // Проблемы управления и информатики.-2002.-№5.
- 22 Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодальных комплексов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2004, №6, стр. 5-16.
- 23 Соколов Б.В., Юсупов Р.М., Микони, С.В. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: состояние исследований и перспективы развития // –СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. - С.44-53.
- 24 Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др.; Под общ. ред. С.В. Емельянова и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техника, 1988.
- 25 Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. – М.: Радио и связь, 1982.
- 26 Юсупов Р.М., Иванищев В.В., Костельцев В.И., Суворов А.И. Принципы квалиметрии моделей // IV СПб Международная конференция «Региональная информатика-95», тез. докладов. – СПб, 1995.
- 27 Florac W.A., Carlton A.D. Measuring the Software Process – Addison-Wesley, 1999. – 272 p.
- 28 Jones C. Software Assessments, Benchmarks, and Best Practice – Addison-Wesley, 2000. – 688 p.

# НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЯМ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Г.Ф. Малыхина

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

[malykhina@icc.spbstu.ru](mailto:malykhina@icc.spbstu.ru)

При проектировании измерительных систем для медицинских приложений не всегда имеется возможность иметь полную информацию и точные знания об объекте измерения. Это связано со следующими причинами:

- неизвестно полное множество внутренних параметров объекта, которые оказывают влияние на косвенно измеряемые величины;
- отсутствуют необходимые датчики, которые позволяют измерять полное множество внутренних параметров, косвенно характеризующих измеряемые величины;
- невозможно применять полное множество датчиков измерительной системы, предназначенной для повседневного использования, которая не должна нарушать комфортность.

В этих случаях можно говорить об измерениях в условиях неполного знания измеряемого объекта, или об измерениях, основанных на неполном векторе внутренних параметров, характеризующих объект измерения (Рис.1).

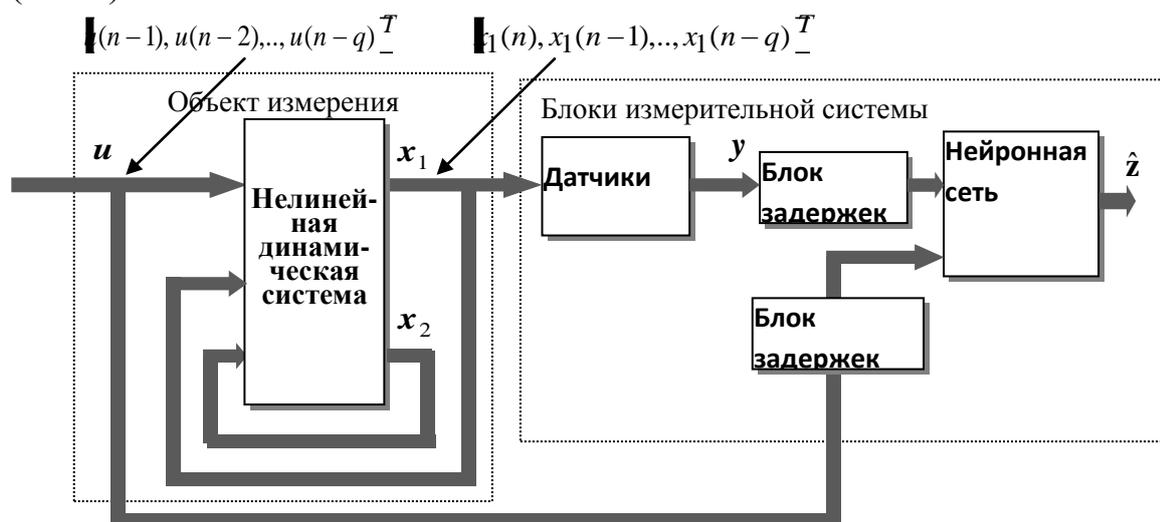


Рисунок 1. Измерение в условиях неполного вектора измеряемых параметров

Неполнота информации о внешней среде оказывает существенное влияние на проектируемую измерительную систему. В качестве примера можно привести позитрон-эмиссионную томографию – получение изображений, путем детектирования радиации эмиссионных позитронов после введения радиоактивных материалов в ткани органов. Каждый датчик регистрирует сигналы, смешанные в неизвестных пропорциях. Таким образом, косвенные измерения должны быть выполнены при неполной информации о среде.

Недостаточная информация о внешней среде может быть дополнена при наличии структурной и информационной избыточности, присутствующей в измерительной системе. Например, измерение параметров движения космического аппарата, спускаемого на поверхность Луны с использованием радиоизотопной системы, работающей на рассеянном гамма-излучении, связано с неопределенностью состава грунта в месте посадки.

В условиях неполной информации об объекте или о среде измерения, целесообразно применение нейросетевого подхода, который позволяет получить следующие преимущества:

- включение процедур моделирования неизвестной величины в алгоритм измерения;
- реализация слепых методов разделения сигналов отдельных источников при смешивании их средой с неизвестными характеристиками;
- адаптация обученной нейронной сети к реальным условиям измерения при наличии структурной и информационной избыточности в измерительной системе.

#### ***Измерение с использованием динамических нейронных сетей.***

Рассмотрим объект измерения, который представляет собой нелинейную динамическую систему дискретного времени, описанную в терминах пространства состояний.

Динамическое поведение системы в предположении об отсутствии шума характеризуется уравнениями:

$$\mathbf{x}(n+1) = \varphi(\mathbf{x}(n), \mathbf{u}(n)) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(n) = \phi(\mathbf{x}(n)) \quad (2)$$

где  $\mathbf{x}(n)$  –  $q$ -вектор, характеризующий состояние нелинейной динамической системы,  $\mathbf{u}(n)$  – входной  $m$ -вектор управляющих воздействий,  $\mathbf{y}(n)$  –  $p$ -вектор, характеризующий выход системы,  $\varphi(\cdot)$  – функция, характеризующая изменение состояний системы, функция  $\phi(\cdot)$  определяет связь между вектором параметров состояниями системы и ее выходом.

Размерность пространства состояний  $q$  определяет порядок системы. Уравнение (1) характеризует процесс функционирования системы, уравнение (2) – процедуру измерения. Если функция  $\phi$  определяет линейное преобразование, то система (1) является линейной. Если функция  $\phi$  в уравнении измерения (2) линейна, то процедура измерения строится как линейное преобразование характеристик состояния системы.

Если разработчик имеет полные знания об объекте измерения, включающие знание модели объекта и всех параметров его состояния, и имеет датчики, позволяющие измерить все эти параметры, то процедура измерения определяется как уравнение (3), включающее также шум измерения  $e(n)$ :

$$\mathbf{y}(n) = \phi(\mathbf{x}(n)) + e(n). \quad (3)$$

Для линейной динамической системы дискретного времени в случае, если только некоторые из состояний объекта могут быть известны исследователю, система характеризуется уравнениями [1]:

$$\mathbf{x}(n+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(n) + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}(n), \quad (4)$$

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(n), \quad (5)$$

где  $\mathbf{A}$  –  $q \times q$ -матрица,  $\mathbf{B}$  –  $q \times (m+1)$ -матрица,  $\mathbf{C}$  –  $q \times q$ -матрица.

Предположим, что только  $k$  параметров состояний объекта могут быть измерены. Тогда матрица  $\mathbf{A}$  эволюции динамической системы в уравнении (4) может быть разделена на блоки:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{pmatrix} \quad (6)$$

где  $\mathbf{A}_{11}$ ,  $\mathbf{A}_{21}$  – матрицы переходов для вектора измеряемых параметров  $\mathbf{x}_1 = (x_1 \dots x_k)^T$ , а  $\mathbf{A}_{12}$ ,  $\mathbf{A}_{22}$  – матрицы переходов для вектора не измеряемых, неизвестных параметров  $\mathbf{x}_2 = (x_{k+1} \dots x_q)^T$ .

Передаточная матрица  $\mathbf{B}$  внешних воздействий на систему, называемая также матрицей внешнего управления, разделяется аналогичным образом на две составляющие с размерностями, согласованными с фрагментами вектора параметров состояния:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_2^T, \quad (7)$$

где  $\mathbf{B}_1$  – матрица управления измеряемыми параметрами состояния системы, где  $\mathbf{B}_2$  – матрица управления не измеряемыми параметрами состояния системы.

Общая матрица уравнения измерения (5) так же естественно расщепляется на два блока меньшей размерности:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

где  $\mathbf{C}_1$  – матрица измерения для параметров, контролируемых датчиками,  $\mathbf{C}_2$  – гипотетическая матрица для не измеряемых датчиками компонентов вектора параметров состояния.

Уравнение измерения с учетом  $\mathbf{x}_1(n)$ ,  $\mathbf{x}_2(n)$  принимает вид:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_1(n) + \mathbf{C}_2 \mathbf{x}_2(n). \quad (9)$$

Вектор не измеряемых параметров  $\mathbf{x}_2(n)$  можно оценить на основе измеряемых параметров  $\mathbf{x}_1(n), \mathbf{x}_1(n-1), \dots, \mathbf{x}_1(n-q)$ .

Итеративное преобразование вектора не измеряемых параметров на основе вектора измеряемых на  $q$ -том шаге характеризуется новым уравнение измерения:

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{C}_1 \mathbf{x}_1(n) + \mathbf{C}_2 [\mathbf{A}_{21} \mathbf{x}_1(n-1) + \mathbf{A}_{22} \mathbf{A}_{21} \mathbf{x}_1(n-2) + \dots + \mathbf{A}_{22}^{q-n} \mathbf{A}_{21} \mathbf{x}_1(n-q) + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}(n-1) + \mathbf{A}_{22} \mathbf{B}_2 \mathbf{u}(n-2) + \dots + \mathbf{A}_{22}^{q-1} \mathbf{B}_2 \mathbf{u}(n-q) + \mathbf{A}_{22}^q \mathbf{x}_2(n-q)] \quad (10)$$

Для возможности выполнения измерений на основе преобразованной формы уравнений, отражающих измерительную систему динамического объекта, требуется, чтобы система была локально управляемой относительно вектора не измеряемых параметров. Это условие обеспечивается, если матрица  $\mathbf{M} = [\mathbf{A}_{22}^{q-1} \mathbf{B}_2 \dots \mathbf{A}_{22} \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2]$  и матрица наблюдаемости  $\mathbf{L} = [\mathbf{I} \ \mathbf{A}_{21} \ \mathbf{A}_{22} \dots \mathbf{A}_{22}^{q-1} \ \mathbf{A}_{21}]$  имеют полный ранг, т.е. определитель матриц не равен нулю  $\text{Det}(\mathbf{M}) \neq 0$ ,  $\text{Det}(\mathbf{L}) \neq 0$  [6,7].

Таким образом, если пренебречь составляющей  $\mathbf{x}_2(n-q)$ , то измерение параметров нелинейной динамической системы в условиях неполной информации выражается в форме (10) как преобразование текущего и предшествующих (на глубину  $q$ ) значений вектора измеренных величин  $\begin{bmatrix} \mathbf{x}_1(n), \mathbf{x}_1(n-1), \dots, \mathbf{x}_1(n-q) \end{bmatrix}^T$  и предшествующих значений вектора управления  $\begin{bmatrix} \mathbf{u}(n-1), \mathbf{u}(n-2), \dots, \mathbf{u}(n-q) \end{bmatrix}^T$ .

Преобразование результатов измерения (18) может быть выполнено с помощью рекуррентной нейронной сети. Нейронная сеть имеет линию задержек на входе, нелинейные активационные функции и моделирует пространство состояний не измеряемой части параметров объекта. В процессе градуировки измерительной системы выполняется обучение нейронной сети, в результате которого определяется необходимое количество задержек на входе, зависящее от порядка системы, структурная сложность нейронной сети (число слоев и число нейронов в каждом слое).

Описанный метод был применен для неинвазивного измерения уровня глюкозы крови на основе показаний реографа [2]. На вход

нейронной сети подавался вектор  $\mathbf{u}(n-1), \mathbf{u}(n-2), \dots, \mathbf{u}(n-q)^T$  управляющих воздействий, включающий количество принятой пищи с учетом ее гликемического индекса, количество жидкости, показатель физической активности. Непосредственно измеряемыми параметрами  $\mathbf{x}_1(n), \mathbf{x}_1(n-1), \dots, \mathbf{x}_1(n-q)^T$  являются комплексные сопротивления тканей на нескольких частотах и температура. На основании непосредственно измеренных параметров и входных параметров удалось определить концентрацию глюкозы в крови.

Таким образом, применение рекуррентной нейронной сети, моделирующей пространство состояний, и внешнее управляющее воздействие на контролируемый объект, позволяет эмулировать систему измерений и после обучения сети выполнять измерения параметров нелинейной динамической системы в условиях недостатка априорных знаний об объекте измерения, и невозможности получить адекватную модель объекта.

***Измерение в условиях неизвестной среды, смешивающей сигналы.*** Неполнота информации о внешней среде оказывает существенное влияние на проектируемую измерительную систему. Рассмотрим случай, когда компоненты вектора  $\mathbf{x}(n)$  сигналов динамической системы смешаны. Такая задача возникает, например, в акустических измерениях, в радиолокации, в позитрон-эмиссионной томографии. Сигналы  $\mathbf{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_q(n)]$  подвергаются смешиванию неизвестной матрицей  $\mathbf{H}$ . Единственно доступным для измерения является вектор наблюдений, который в матричной форме можно представить следующим выражением [3]:  $\mathbf{x}_1(n) = \mathbf{H}\mathbf{x}(n) + \mathbf{v}(n)$ , где  $\mathbf{v}(n) = [v_1(n), v_2(n), \dots, v_q(n)]^T$  - вектор шума. Доступна для измерений смесь сигнала и шума. Интересующим нас, подлежащим измерению, является вектор-сигнал  $\mathbf{x}(n)$ , который является результатом применения разделяющей матрицы  $\mathbf{W}$  к непосредственно измеренному сигналу:  $\mathbf{y}(n) = \mathbf{W}\mathbf{x}_1(n)$ . Другими словами, задача восстановления заключается в поиске матрицы  $\mathbf{W}$ , обратной по отношению к смешивающей матрице  $\mathbf{H}$ , неизвестной исследователю.

Задача измерения в условиях неизвестной среды, смешивающей сигналы, может быть по-разному решена в случае, если необходимо получить все компоненты вектора  $\mathbf{x}(n)$ , представляющие полезные сигналы, или только часть компонентов вектора  $\mathbf{x}(n)$ , не восстанавливая входящие в него компоненты шума. Поскольку присутствие шума является более общим случаем, рассмотрим метод слепого извлечения полезных сигналов из смеси. Этот метод может быть выполнен с использованием каскадной нейронной сети, подстраивающей веса матрицы  $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m]$  (Рис. 2).

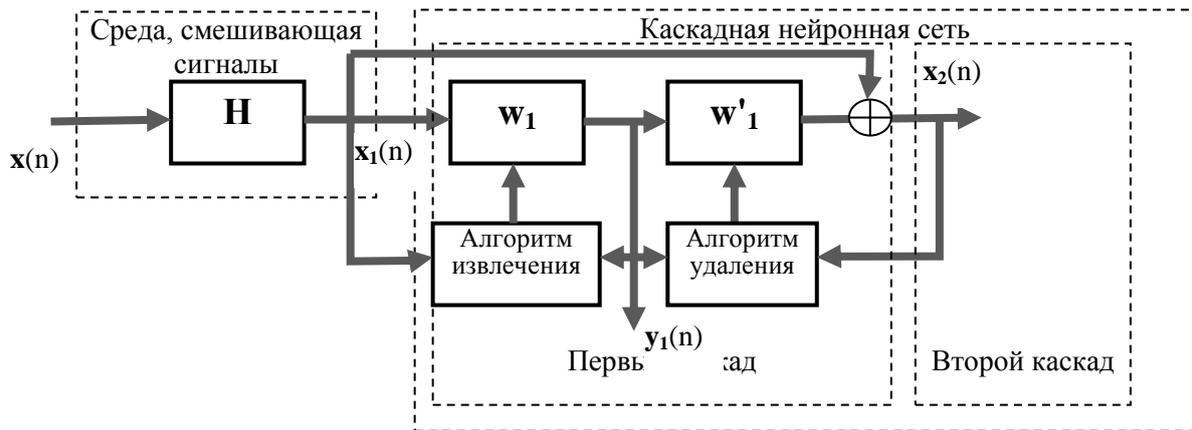


Рисунок 2. Каскадная нейронная сеть для извлечения сигналов

Первый каскад нейронной сети выполняет извлечения первого компонента сигнала со специфическими статистическими свойствами. Второй каскад удаляет извлеченный компонент из смеси. Удаление извлеченного сигнала позволяет снижать размерность задачи на следующем шаге, где для второго компонента сигнала повторяется процедура извлечения и удаления. Число каскадов нейронной сети зависит от числа компонентов сигнала, подлежащих извлечению и измерению. Реализация процедуры извлечения сигналов основана на разнице статистических свойств компонентов вектора  $\mathbf{x}(n)$ , которые характеризуются функцией плотности вероятностей (ФПВ).

В качестве целевой функции при поиске оптимальных значений  $\mathbf{W}$  предложено использовать обобщенные статистические моменты высокого порядка, которые более чувствительны к различию между ФПВ. Поэтому были использованы обобщенная асимметрия  $A_{p1q1}$  порядка  $p$  и обобщенный эксцесс  $K_{p2q2}$  порядка  $p2, q2$ , которые определяются по формулам:

$$A_{p1q1} = \frac{E \{ \text{sign}(y) \cdot |y|^{p1} \}}{E \{ |y|^{p1/q1} \}} \quad (11)$$

$$K_{p2q2} = \frac{E \{ |y|^{p2} \}}{E \{ |y|^{p2/q2} \}} \quad (12)$$

Целевая функция основана на двух обобщенных моментах:

$$J_{p1q1p2q2}(\mathbf{w}) = \frac{1}{p1} A_{p1q1}(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_1) + \frac{1}{p2} K_{p2q2}(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_1). \quad (13)$$

Анализ статистических погрешностей оценки обобщенной асимметрии и обобщенного эксцесса показал, что в смысле расстояния Махаланобиса для асимметрии  $A_{p_1q_1}$  лучшие различающие свойства достигаются при  $(p_1 = 2, q_1 = 1)$ , а для эксцесса  $K_{p_2q_2}$  - при  $(p_2 = 1, q_2 = 1/2)$ .

Предложенный нейросетевой метод был применен для восстановления сигналов в каналах системы измерения параметров светоизлучающих диодов [4], в динамической позитрон-эмиссионной томографии для разделения изображений тканей левого и правого желудочка сердца [5] и др.

### ***Адаптация обученной нейронной сети к реальным условиям измерения.***

Недостаточная информация о внешней среде может оказывать существенное влияние на результаты измерения. Особенно остро проблема недостатка информации представлена при выполнении исследовательских проектов, например, при организации экспедиции на другие планеты. В частности, при спуске на поверхность Луны измерение параметров движения космического аппарата выполняется с использованием радиоизотопной системы, работающей на рассеянном гамма-излучении.

Состав грунта определяет величину комптоновского сечения, которое в зависимости от состава может изменяться значительно. В результате экспедиций на Луну состав грунта был изучен на некоторых участках ее поверхности, в местах посадки исследовательских модулей [6]. Тем не менее, посадка должна пройти успешно и в других, неисследованных ранее областях, и при отклонении от расчетного места посадки.

Для этой цели разработан алгоритм измерения, адаптирующийся к месту посадки (Рис.3). Алгоритм объединяет показания двух высотомеров, работающих на разных физических принципах: радиовысотомера и фотонного высотомера. Два прибора работают в разных диапазонах высот. В процессе приближения к поверхности погрешности радиовысотомера возрастают, а погрешности фотонного высотомера уменьшаются. На интервале высот от 20 до 10 м работают одновременно два высотомера, показания одного из которых зависят от состава грунта. Это дает возможность выполнять адаптацию алгоритма фотонного высотомера с учетом показаний радиовысотомера с последующим плавным переключением на показания фотонного высотомера.

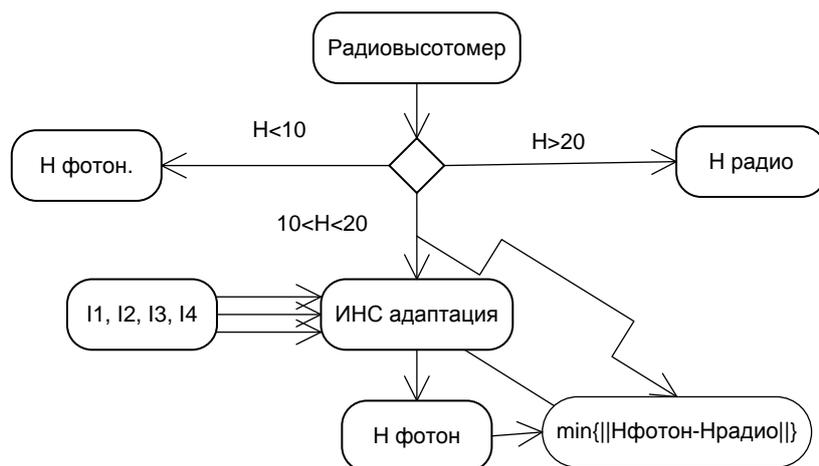


Рисунок 3. Адаптация нейронной сети для измерения параметров движения спускаемого аппарата на высоте от 20 до 10м.

Нейронная сеть может быть адаптирована в новых условиях окружающей среды. В условиях нестационарной среды, свойства которой изменяются с течением времени, могут быть использованы нейронные сети, адаптирующиеся в реальном времени, причем, чем выше адаптивные способности системы, тем более устойчивой будет ее работа в нестационарной среде [5].

На высотах от 20 м до 10 м выходные сигналы детекторов рассеянного гамма-излучения  $I_1, I_2, I_3, I_4$  используются для адаптации нейронной сети на основе измерения высоты с помощью радиовысотомера  $H_{радио}$ . Для устранения влияния углов наклона спускаемого аппарата предложено выполнять суммирование выходов четырех детекторов. На основе адаптации нейронной сети будет получена сеть, соответствующая текущему значению  $\sigma_0$  комптоновского рассеяния, характеризующая состав грунта поверхности. Для измерения на высотах от 10 до 0.3 м предложено использовать обученную нейронную сеть ИНС<sub>i</sub>, адаптированную к составу грунта.

#### Литература

1. Haykin, Simon. Neural networks and learning machines / Simon Haykin.—3rd ed. PrenticeHall.2009, 938 pp.
2. Ю.А. Гродецкий, К.Э. Кудряшов, Г.Ф. Малыгина. Искусственная нейронная сеть для обработки сигнала глюкореографа. «Нейрокомпьютеры»: Разработка, Применение, №3, 2009, с.29-32.
3. S. Amari, A. Cichocki. Adaptive blind signal and images processing.: Learning algorithm and application. John Willey & Sons, USA 2002, pages 587.

4. А.В. Картамышев, Г.В. Малыхина. Методика удаления шума в измерителе параметров эталонных излучателей. «Нейрокомпьютеры»: Разработка, Применение, № 6, 2007.
5. Margarita Magadan-Mendez, Anu Juslin, Sergey V. Nesterov, Kari Kalliokoski, Juhani Knuuti, Ulla Ruotsalainen ICA Separation of Functional Components from Dynamic Cardiac PET data. IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine. 2008, p. 93-102.
6. Малыхина Г.Ф., Кислицына И.А. Измерение параметров движения с использованием нейронных сетей. Информатика. Телекоммуникации. Управление. Научно-технические ведомости СПб ГПУ, №5, 2015, с. 59-68.

## РЕГИСТРАЦИЯ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЭГ-ПАТТЕРНОВ ВООБРАЖАЕМЫХ ДВИЖЕНИЙ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИНТЕРФЕЙСА МОЗГ-КОМПЬЮТЕР

Станкевич Л.А.<sup>1</sup>, Шемякина Н.В.<sup>2</sup>, Сонькин К.М.<sup>3</sup>, Нагорнова Ж.В.<sup>2</sup>,  
Хоменко Ю.Г.<sup>4</sup>, Гунделах Ф.В.<sup>1</sup> Чевыкалова А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова  
РАН, Санкт-Петербург

<sup>3</sup> ООО «АйБрейн»

<sup>4</sup> Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург  
[stankevich\\_lev@inbox.ru](mailto:stankevich_lev@inbox.ru)

Развитие человечества тесно связано с развитием средств человеко-машинных коммуникаций. На первых этапах развития компьютерной техники и машин, управляемых компьютерами, люди общались с ними с помощью традиционных компьютерных средств коммуникаций, включающих клавиатуры, мониторы, принтеры, устройства графического ввода и вывода, реализующие *простые интерфейсы*. С развитием искусственного интеллекта появились средства более естественных для человека речевых и визуальных коммуникаций, на базе которых были созданы и продолжают совершенствоваться так называемые *интеллектуальные интерфейсы*. В конце 20-го и в начале 21-го веков наблюдается бурное развитие науки о мозге, а в последнее время - междисциплинарных исследований, делающих попытки интегрировать знания о специфике сигналов, производимых мозгом, результаты распознавания таких сигналов и представления о методах искусственного интеллекта, что привело к возможности создания новых средств человеко-машинных коммуникаций – *нейроинтерфейсов* [1].

В данной работе обсуждаются подходы к созданию интерфейсов «мозг-компьютер» (ИМК), основанных на распознавании ЭЭГ-паттернов воображаемых движений. Интерфейс «мозг-компьютер» - это, фактически, некий программно-аппаратный комплекс, считывающий и «переводящий» сигналы мозга в управляющую внешним устройством или программой команду. В основе большинства нейроинтерфейсов лежит принцип считывания и декодирования биоэлектрической активности мозга, изменяющейся при выполнении той или иной деятельности, изменении состояния или восприятии внешних стимулов. В зависимости от способа регистрации биоэлектрической активности ИМК могут быть инвазивными (с хирургическим вмешательством, например, имплантацией электродов) и

неинвазивными (то есть, при регистрации биоэлектрической активности непосредственно с поверхности кожи головы). Декодирование (распознавание и классификация) зарегистрированных биоэлектрических сигналов может быть выполнено с использованием развитых в последнее время интеллектуальных методов обработки информации и принятия решений. Проблемой существующих нейроинтерфейсов, особенно неинвазивных, является низкая точность распознавания мозговой активности.

Вместе с тем, как показывают исследования последних лет, использование ИМК на основе ЭЭГ для реабилитации – целесообразно, в частности, для пациентов с нарушениями двигательных функций.

Предполагается, что воображаемые и реальные движения имеют одинаковые нейробиологические корреляты и приблизительно одинаковое время реализации [2,3], и это время в обоих случаях увеличивается с повышением сложности и точности двигательной задачи (закон Фиттса) [4,5]. Соответствие реальных и воображаемых движений наблюдается у здоровых лиц и пациентов, например, с болезнью Паркинсона и после инсульта [6,7].

В работах соотечественников было показано, что обучение управлению через ИМК может не зависеть от давности заболевания, локализации очага поражения и тяжести неврологического дефицита [8,9]. Используя ресурсы пластичности мозга [10], реабилитационные мероприятия могут быть эффективны и по прошествии ряда лет после травмы или инсульта [11].

Важным моментом разработок ИМК является то, что управление, например, программой, внешним вспомогательным роботизированным устройством – происходит в реальном времени, то есть человек сразу видит результат своих усилий, получает обратную связь и учится управлять своим состоянием, чтобы достигнуть определенного эффекта. Вместе с тем, реабилитационный эффект может проявляться не сразу, а при достаточно длительных тренировках – до шести и более недель [12].

В настоящее время созданы инвазивные и неинвазивные нейроинтерфейсы, которые позволяют распознавать некоторые моторные команды мозга и мышечные сигналы, подавать результаты их декодирования в компьютеры с целью управления разнообразными внешними устройствами, в том числе медицинского назначения.

По мнению экспертов, нейроинтерфейсы – перспективная отрасль с огромным потенциалом. По этой причине исследования в этой области ведутся практически во всех развитых странах мира (для обзора см. [13]). Такие страны как США и Китай не только проводят научные исследования, но уже выпустили коммерчески доступные нейроинтерфейсы массового спроса, такие как EmotiveInsight (США),

Neurosky (США) и Brainlink (Китай) с собственными магазинами приложений для настольных и мобильных устройств на популярных платформах типа iOS, Android, Windows, Linux, MacOSX.

Целью данной работы была разработка неинвазивного ИМК, основанного на распознавании воображаемых движений мелкой моторики на базе мобильного 21-канального электроэнцефалографа SmartBCI (ООО Мицар, Санкт-Петербург).

В ЭЭГ исследованиях приняли участие 10 здоровых испытуемых (средний возраст 26.2[SD=3.1]). Испытуемые были здоровы на момент исследования и сообщали, что не имеют никаких медицинских и нейрофизиологических нарушений, имеют нормальное зрение. Все процедуры исследования выполнялись в соответствии с Хельсинской декларацией (1974) о проведении исследований с участием добровольцев.

В качестве заданий испытуемым предлагали выполнять задачи на воображение движений, совершаемых пальцами правой руки. Проводили, как одиночные серии исследований, так и исследования влияния тренировок на точность мультиклассовой классификации воображаемых движений.

В качестве парадигмы использовали воображение движений в заданном звуками ритме [14] – воображение движений совершалось каждые 700 мс. Испытуемым предлагалось выполнять четыре типа воображаемых движений: мизинцем, большим, указательным, средним пальцами правой руки, предварительно синхронизуя ритм воображения про себя с внешними звуками, задававшими ритм и темп воображения. Последовательность выполнения заданий была рандомизирована между испытуемыми. Инструкция на воображение движений пальцами была ориентирована на инициацию кинестетических ощущений у испытуемого [15]. Показано, что при возникновении кинестетических ощущений при воображении движений зоной интереса являются сенсомоторные зоны коры, как и при выполнении реальных моторных команд. Задания имели блоковую схему. В общей совокупности испытуемый выполнял – не менее 100 реальных и 130 – воображаемых движений в заданном темпе для каждого из пальцев.

Процедура регистрации ЭЭГ. При проведении первоначальных тестирований и подбора индивидуальных признаков для декодирования ЭЭГ паттернов ЭЭГ регистрировали монополярно от 19 отведений ЭЭГ в соответствии со стандартной системой 10-20 с использованием многоканального электроэнцефалографа ООО Мицар (ЧД 500 Гц). В ходе тренировок ЭЭГ регистрировался монополярно от 21-ти отведений (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2 по системе 10-20) с использованием мобильного, портативного, беспроводного электроэнцефалографа SmartBCI (ООО Мицар, ЧД 250Гц).

В обоих случаях референтные электроды располагались на мочках обеих ушей, заземляющий электрод – во фронтальной части головы. Регистрацию ЭЭГ проводили в полосе 0.53 - 30 Гц с применением сетевого фильтра 45-55 и 95-105 Гц, для записи ЭЭГ в первом случае использовали программу WinEEG (авторские права - Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д. № LtD 2001610516 от 08.05.2001), при работе с мобильным электроэнцефалографом данные подавались через LSL поток в среду MatLab и фиксировались, фильтровались, преобразовывались и классифицировались с использованием самостоятельно разработанного ПО. В обоих случаях сопротивление электродов не превышало 5 кОм.

В ходе анализа результатов отдельных записей и результатов сессий тренировки данные отфильтровывались, очищались от артефактов: удалялись медленные сигналы с амплитудой более 50  $\mu\text{V}$  в полосе 0-2 Гц и быстрые сигналы с амплитудой более 35  $\mu\text{V}$  в полосе 20-35 Гц. Данные приводились к различным преобразованиям, при этом, по результатам ранее проведенной работы, выбор был сделан в пользу преобразования ЭЭГ к плотности источника тока [16], процедура соответствовала проводимой в работе [14] и была реализованы в режиме online.

В качестве признаков использовали сложность кривой, кепстральные коэффициенты, коэффициенты вайвлет преобразований.

При анализе точности классификации ЭЭГ паттернов воображаемых движений без накопления – подход «single-trial» – наилучший результат был получен при использовании преобразования к плотности источников тока в сочетании со следующими характерными признаками: кепстральными коэффициентами и сложностью кривой, вычисленной в скользящем временном окне. Средний процент классификации для 4-х классов воображаемых движений мелкой моторики составил 66 % $\pm$ 8[SD], лучший результат – 79 % при выборе отведений ЭЭГ по результатам картирования из всех отведений; а при выборе из зон только сенсомоторной коры с теми же условиями: 62 %  $\pm$ 9 [SD] по группе, лучший результат также 79 %.

В качестве инструмента классификации использовали разработанную ранее систему, представляющую собой комитет классификаторов (нейронных сетей и метода опорных векторов) [14]. Использование для создания ИМК ансамблей и комитетов классификаторов является одним из разрабатываемых подходов для повышения точности распознавания до 93-100 % для двухклассовой задачи [14] и снижения временных затрат (в два раза большее быстроедействие ИМК, основанном на регистрации компонента P300 по сравнению с одинарными классификаторами) [17].

Выявлена возможность применения нового разработанного комитета классификаторов на основе одновременно используемых нескольких

пространств признаков (длина, площадь, коэффициенты вейвлет преобразования, кепстральные коэффициенты) в on-line режиме для управления виртуальными и физическим средствами предоставления биологической обратной связи. В перспективе разрабатываемая система классификации ЭЭГ паттернов воображаемых движений может использоваться в ИМК с тактильной или электростимуляционной обратной связью. Во многих работах указывается на повышение эффективности ИМК с включением в контур ИМК обратной связи в виде пассивных движений, тактильной или искусственной обратной связи [18].

Работа поддержана грантом РФФИ офи-м №16-29-08296

## Литература

- 1 Станкевич Л.А., Сонькин К.М., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В., Хоменко Ю.Г. М.: НИЯУ МИФИ. 2016. С. 105-146.
- 2 Crammond D.J. Trends Neurosci. 1997. V. 20. N. 2. P. 54.
- 3 Porro C.A., Francescato M.P., Cettolo V. Diamond M.E., Baraldi P., Zuiani C., Bazzocchi M., di Prampero P.E. J. Neurosci. 1996. V. 16. № 23. P. 7688.
- 4 Dominey P., Decety J., Broussolle E., Chazot G., Jeannerod M. Neuropsychologia. 1995. V. 33, N. 6. P. 727-741.
- 5 Jeannerod M., Frak V. Current Opinion in Neurobiology. 1999. V. 9. P. 735.
- 6 Morales I., Dopico J.G., Sabate M., Gonzalez-Hernandez T., Rodriguez M. American Journal of Physiology-Cell Physiology. 2007. V. 292. P. 1934.
- 7 Gonzalez B., Rodriguez M., Ramirez C., Sabate M. Behavioral Neuroscience. 2005. V. 119. P. 622.
- 8 Мокиенко О.А., Люкманов Р. Х., Черникова Л. А., Супонева Н. А., Пирадов М. А., Фролов А. А. Физиология человека. 2016. Т. 42, вып. 1. С. 31–39.
- 9 Frolov A.A., Husek D., Biryukova E.V., Bobrov P.D., Mokienko O.A., Alexandrov A.V. NNW2017 DOI: 10.14311/NNW.2017.27.006
- 10 Nudo R.J., Wise B.M., SiFuentes F., Milliken G.W. Science. 1996. V. 272, N. 5269. P. 1791-1794.
- 11 Taub E., Uswatte G., Elbert T. Nat Rev Neurosci. 2002. V. 3, N. 3. P. 228-236.
- 12 Liu Y., Li M., Zhang H., Wang H., Li J., Jia J., Wu Y., Zhang L. J Neurosci Methods. 2014. V. 222. P. 238-249.
- 13 Brunner C, Birbaumer N, Blankertz B, Guger Ch, Kübler A, Mattia D, Millán J, Miralles F, Nijholt A, Opisso E, Ramsey N, Salomon P & Müller-Putz G. Brain-Computer Interfaces 2015. V. 2 , Iss. 1.
- 14 Станкевич Л.А., Сонькин К.М., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В.,

- Хоменко Ю.Г., Перец Д.С., Коваль А.В. Физиология человека. 2016. Т. 42, В.1. С. 1-12.
- 15 Neuper C., Scherer R., Reiner M., Pfurtscheller G. Brain Res Cogn Brain Res. 2005. V.25, N. 3. P. 668-677.
- 16 Tenke С.Е., Kayser J. Clin Neurophysiol. 2012. V.123. N. 12. P. 2328-2345.
- 17 Кирьянов Д.А., Каплан А.Я. Наука и инновации в медицине. 2016. вып. 3. С. 28-32.
- 18 Бадаквa А.М., Миллер Н.В., Зобова Л.Н. Физиология человека. 2016. Т. 42, вып.1. С. 128–136.

# AN INTRODUCTION TO PRISM SIGNAL PROCESSING APPLIED TO SENSOR VALIDATION

Manus P.Henry  
*University of Oxford*  
[manus.henry@eng.ox.ac.uk](mailto:manus.henry@eng.ox.ac.uk)

## О ПРОЦЕДУРЕ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ PRISM В ПРИМЕНЕНИИ К ВАЛИДАЦИИ ДАТЧИКОВ

Интернет вещей (IoT) [1] и Индустрия 4.0 [2] предполагают существенное расширение применения датчиков в самых разных средах. Проблемы значительны: локальная вычислительная мощность должна быть эффективно и гибко использована как для выполнения текущих метрологических задач, так и для перенастройки / перестройки потока обрабатываемых сигналов, поскольку требования к мониторингу меняются во времени.

В этой статье представлен PRISM, применяющий повторное интегрирование в процессе мониторинга сигнала. Это новый тип блока обработки сигналов, который может внести вклад в решение задач метрологии 21-го века. PRISM действует как полностью рекурсивный, КИХ-фильтр с двойным выходом: вычислительная нагрузка низкая и не зависит от длины окна данных. Конструкция PRISM тривиальна, так что сети PRISM могут быть собраны, как во время разработки, так и автономно в режиме реального времени, и выполнять широкий спектр метрологических задач. Блоки отслеживания сигнала, основанные на PRISM, для частоты, фазы и / или амплитуды синусоиды функционируют близко к нижней границе Крамера-Рао (CRLB) для отношения сигнал/шум до 0 дБ.

Два достоинства обработки сигнала PRISM - низкие вычислительные затраты и незначительная стоимость проектирования - важны для разработки простых методов валидации датчиков [3]. Пример симуляции демонстрирует, как обработка сигнала PRISM может использоваться для автономного обнаружения, отслеживания и компенсации нежелательной частотной составляющей в частотном датчике.

### **Abstract**

The Internet of Things (IoT) [1] and Industrie 4.0 [2] propose substantial increases in the deployment of sensors into a diverse range of environments. The challenges are considerable: local computational power must be efficiently and flexibly deployed both to perform current metrological tasks and to reconfigure/redesign the signal processing flow as monitoring requirements evolve over time.

This paper introduces the Prism (precise, repeat integral, signal monitor), a new type of signal processing block, as a contribution towards to the challenges of 21<sup>st</sup> Century metrology. The Prism acts as a fully recursive, dual output, FIR filter: the computational burden is low and independent of data window length. Prism design is trivial, so that networks of Prisms can be assembled, whether at design

time or autonomously in real time, to carry out a wide range of metrological tasks. Prism-based trackers for the frequency, phase and/or amplitude of a sinusoid perform close to the Cramer-Rao Lower Bound (CRLB) for SNRs down to 0 dB. Two aspects of Prism signal processing: low computational and negligible design costs, provide useful tools for the development of simple sensor validation techniques [3]. A simulation example demonstrates how Prism signal processing can be used to autonomously detect, track, and compensate for an undesired frequency component in a frequency-based sensor.

### 1. The Prism

The Prism (Fig. 1) is a signal processing block accepting an input time series  $s(t)$  and generating one, or more usually two, output time series,  $G_s(t)$  and/or  $G_c(t)$ . Internally, it is structured as two layers of integration blocks, where each input signal is multiplied by a modulating sine or cosine function of characteristic frequency  $m$  and harmonic number  $h$  (a small integer, often 1), and the resulting product is integrated over the last  $1/m$  seconds. The two outputs result from a sum and a difference of second stage integrals. The Prism can be viewed as a pair of FIR filters operating over a window of the input data  $s(t)$  of total duration  $2/m$ . Unusually, the Prism calculations can be performed recursively, so that the computational effort needed per sample is small, and is independent of the Prism window length.

This facilitates high data throughput for a given computational budget. Another significant advantage of the Prism is that the filter ‘coefficients’ are simply the linearly spaced sine and cosine values of the modulation functions. Accordingly, the computation requirement to ‘design’ a Prism with desired  $m$  and  $h$  values is very low, and so it is possible to instantiate new Prism-based signal processing schemes in real time on resource-limit devices using simple rules. Further details of the Prism will be given in later publications.

For a steady sinusoidal input with amplitude  $A$ , frequency  $f$  and initial phase  $\phi_i$  (i.e. the phase at  $t = 0$ )

$$s(t) = A \sin(2\pi ft + \phi_i), \quad (1)$$

the Prism outputs  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$  are given by:

$$G_s(t) = A \operatorname{sinc}^2(r) \frac{r^2}{r^2 - h^2} \sin(\phi(t) - 2\pi r) \quad (2)$$

and

$$G_c(t) = A \operatorname{sinc}^2(r) \frac{hr}{r^2 - h^2} \cos(\phi(t) - 2\pi r), \quad (3)$$

where the true instantaneous phase  $\phi(t) = 2\pi ft + \phi_i$ ;  $r = f/m$ , the frequency ratio; and  $\operatorname{sinc}(x)$  is the normalized sinc function. The Prism outputs have a linear phase delay  $2\pi r$ , while the gains of  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$  for  $h = 1$ , labelled  $\Gamma_s$  and  $\Gamma_c$  respectively, are shown in Fig. 2; these exhibit a generally low pass characteristic with periodic notches at multiples of  $m$ , including at zero hertz.

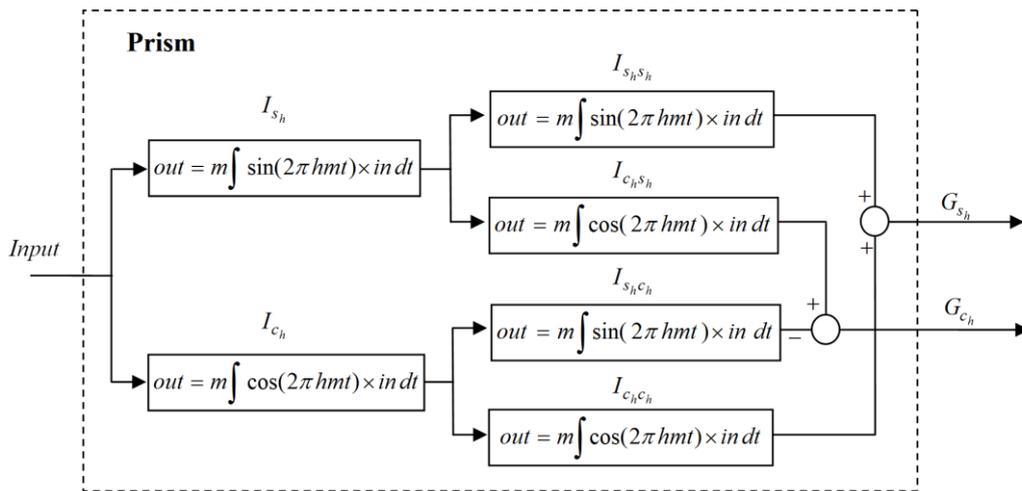


Figure 1. Prism signal processing block with time series input and time series outputs  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$ . The design parameters are  $m$  the characteristic frequency, and  $h$  the harmonic number

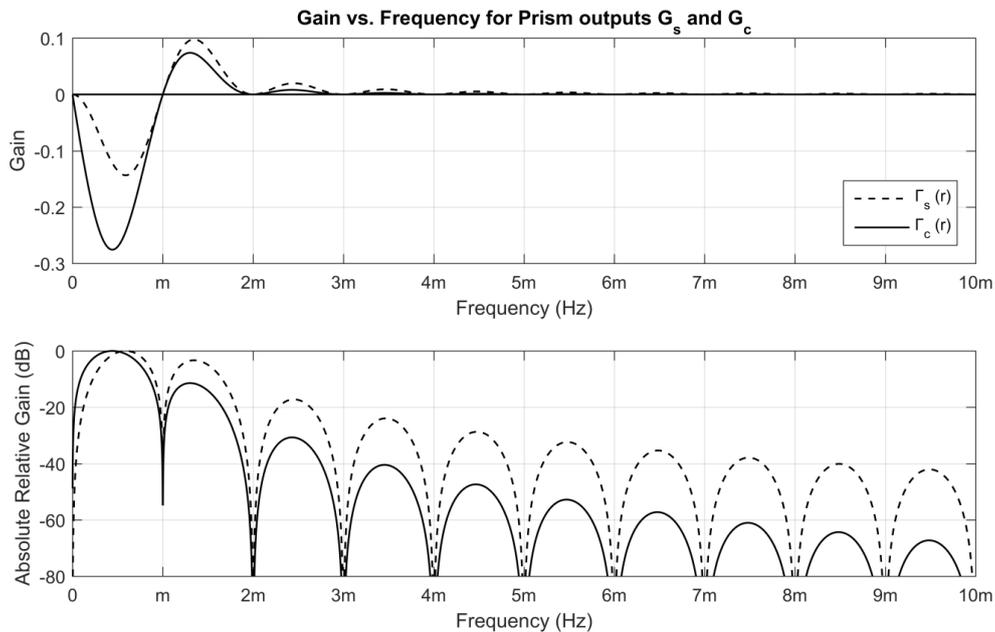


Figure 2. Gains of Prism outputs  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$  with harmonic number  $h = 1$

The two Prism outputs  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$  are orthogonal (i.e. a sine/cosine pair), and other than a scaling factor  $h/r$ , they form an analytic function from which sample-by-sample estimates of frequency, amplitude and phase may be derived. In other words, given an input signal with unknown sinusoidal properties, which is passed through a Prism with characteristic frequency  $m$ , the sinusoidal parameters may be estimated based on values of  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$ . One means of tracking a single sinusoid is the Recursive Signal Tracker (RST) block which employs a single Prism and recent history of  $G_s(t)$  and  $G_c(t)$ .

Reference [4], co-authored with Russian colleagues at SUSU in Chelyabinsk, outlines the RST calculation, along with its application to a pressure sensor validation problem. The mechanical integrity of the pressure

sensor is tested by regular excitation from ultrasonic pulses. The response of the pressure sensor structure to each pulse takes the form of multiple exponentially decaying sinusoids combined into a single signal, where the properties (frequency, initial amplitude, decay rate) of each sinusoid are used to detect faults such as the fouling of the sensing membrane. A variety of Prism-based techniques are used to isolate individual frequency components for tracking. These include low pass and bandpass filtering, conventional static notch filtering, and a new technique called dynamic notch filtering, whereby one or more frequency components can be removed from a signal and where the notched frequencies can be selected in real time. This entails forming linear combinations of Prism outputs [4], where the Prisms share a common characteristic frequency  $m$ , but use different harmonic values  $h$ . Linear combinations of the same Prism outputs, but using different weightings, have the effect of notching out different frequency components, and so it is possible to ‘split’ a multi-component signal into a set of individual signals, each carrying only a single frequency component, which may then be tracked using an RST. As illustrated in [4], such signal splitting may be implemented sample-by-sample with low computational cost.

The Prism thus provides a useful toolkit for basic signal processing tasks where the compute and design requirements are low, and hence is suited to the challenges of metrology in the 21<sup>st</sup> Century, where the Internet of Things provides ubiquitous, adaptable sensing.

## 2. *Sensor Validation Example*

An example is now given of how Prism-based techniques may be used to carry out the following tasks: tracking a signal consisting of a single frequency component; detecting the presence of an anomalous frequency component in the signal; and then instantiating additional Prism-based signal processing to isolate and track both the original frequency component and the anomalous frequency component. The resource requirements for both the instantiation (including the design) and the operation of this validation scheme are sufficiently low that it is suited for the low cost, autonomous sensors of the IoT.

Figure 3 shows an initial arrangement where an input signal, for example from a resonant transducer, is being tracked by a RST, which generates sample-by-sample estimates of frequency, amplitude and/or phase, under the assumption that the input signal has only a single frequency component to be tracked. These parameters may in turn be mapped onto appropriate engineering units to calculate the measurand under consideration (for example, pressure, temperature, flow rate etc). For the purposes of this simulation, the underlying sensing technology is not important. Rather, this is a generic and simplified example that may be mapped onto a number of specific measurement technologies.

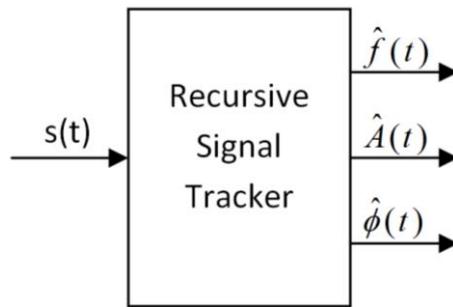


Figure 3. Sensor validation example: initial signal processing scheme. The transducer signal  $s(t)$  is analysed using an RST to generate sample-by-sample estimates of frequency, amplitude and phase

In the simulation study that follows, the sample rate  $f_s = 51.2$  kHz, and the RST uses  $m = 200$  Hz for tracking the input signal. For the first 100 seconds of the simulation, only a single frequency component, denoted the Primary component, is present. This has a frequency of 81 Hz and an amplitude of 0.5 V. The input signal includes white noise with a standard deviation of  $1e-5$  V. After 100 seconds, an additional frequency component, denoted the Interference component, is added to the input signal, thus simulating the onset of an unexpected anomaly, as might be caused by an internal fault or some external interference. In this example the additional frequency component has a constant frequency of 53 Hz and an amplitude of 1 mV ( $1e-3$  V). Note that the signal processing design is general and is not tuned to any of the specific parameter values stated here.

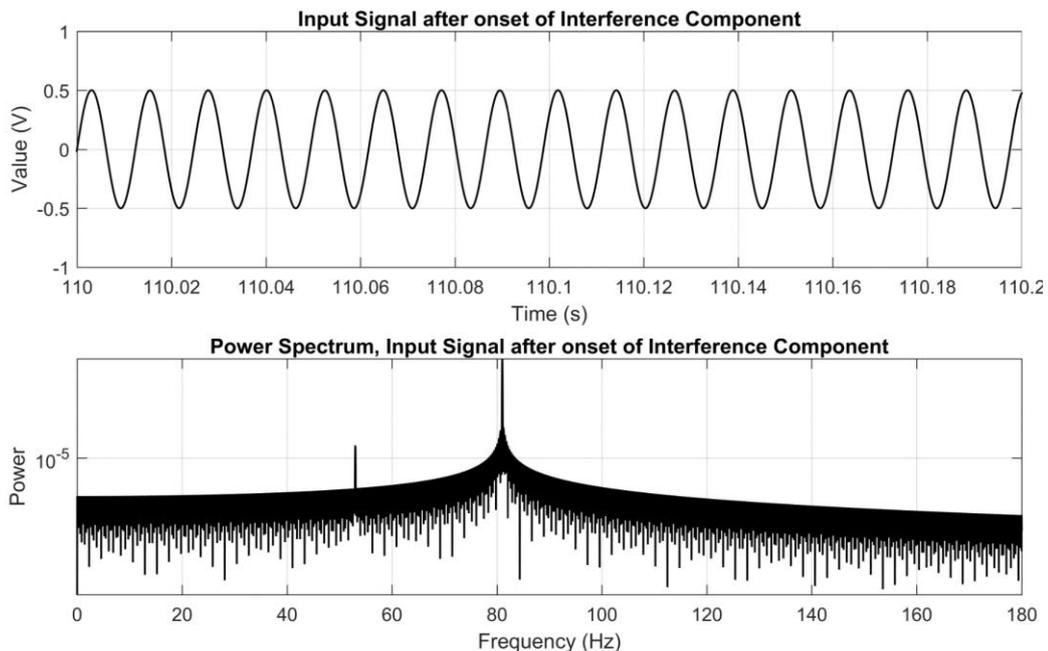


Figure 4. Raw transducer signal and power spectrum after onset of fault

Figures 4 and 5 demonstrate the impact such an anomaly has on the RST signal tracking. Figure 4 (upper) shows a time sequence of the input signal, after the onset of the fault. Given the low amplitude of the Interference component there is little observable change in the time series. However in the lower plot the corresponding power spectrum (for the time  $t = 100 \text{ s} \dots 200 \text{ s}$ ) shows the presence of the Interference frequency component at 53 Hz as well as the Primary frequency components at 81 Hz.

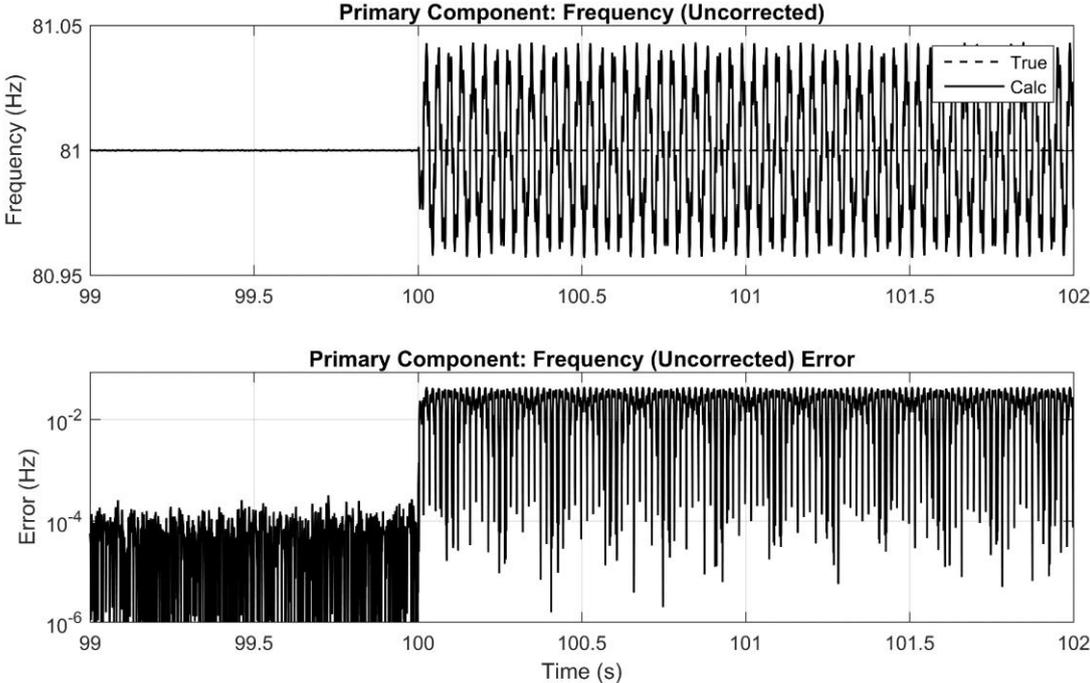


Figure 5. RST calculated value of frequency (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

Figure 5 shows the estimate of frequency generated by the RST during the onset of the Interference component. The upper plot shows the time sequence of the frequency estimate: a clear change in behaviour takes place at  $t = 100 \text{ s}$ , when the Interference component is included in the input signal  $s(t)$ . The lower plot shows the magnitude of the frequency error on a logarithmic scale. Prior to the onset of the Interference component the frequency error was approximately within the range  $\pm 1 \text{e-}4 \text{ Hz}$ , but after the onset of the Interference component the frequency error range increased to approximately  $\pm 5 \text{e-}2 \text{ Hz}$ . Similar changes are observed in the errors for the amplitude and phase tracking (graphs not shown). Before the ‘fault’ the amplitude error was within the range  $\pm 5 \text{e-}6 \text{ V}$ , but afterwards the amplitude error range increased to  $\pm 1 \text{e-}3 \text{ V}$ . Similarly, prior to the fault the phase error was approximately  $\pm 1 \text{e-}5 \text{ radians}$ , but afterwards the phase error range increased to  $\pm 1 \text{e-}2 \text{ radians}$ .

Figure 6 demonstrates that the impact of the Interference component on the calculated values of frequency is to introduce a cyclical error. The upper plot shows a close up of the RST frequency time series after the onset of the fault,

which shows a repeated cycling pattern. The lower plot shows the power spectrum of the entire RST frequency estimate for  $t = 100$  s to  $t = 200$  s. It is important to appreciate that this is not the power spectrum of the original signal  $s(t)$ . Rather, the frequency output of the RST is treated as a separate signal in its own right, and the power spectrum is performed upon the resulting time series. Accordingly, the RST frequency output has a large DC (zero hertz) component, corresponding to the true parameter value of 81 Hz, but in addition there are two peaks at approximately 28 Hz and 134 Hz. These are the so-called beat frequencies, found by forming the difference and sum respectively of the two original frequencies ( $81 \text{ Hz} - 51 \text{ Hz} = 28 \text{ Hz}$ , and  $81 \text{ Hz} + 53 \text{ Hz} = 134 \text{ Hz}$ ).

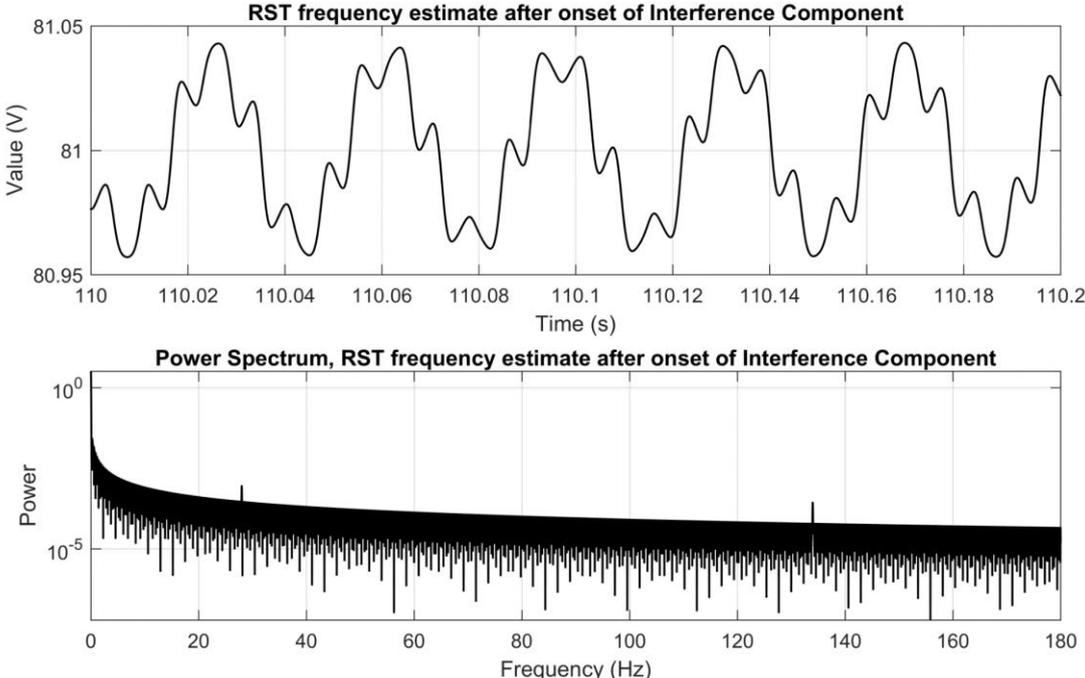


Figure 6. Detail of RST calculated value of frequency (upper); Power spectrum of frequency estimate (lower).

Similar beating behaviour is observed on the amplitude estimate; these symptoms both define the measurement interference problem, and suggest a means of detecting and ultimately compensating for these effects.

Figure 7 shows an extension to the original RST tracker scheme of Figure 3. The RST on the left is comparable to that of Figure 3 but additional signal processing is provided to detect any interference component in the input signal  $s(t)$ . This includes a second RST which accepts the frequency estimate of the first RST as an input and estimates the frequency of variation of this parameter – effectively, it is being used to track the (lower) beat frequency. This estimated ‘raw’ beat frequency is fed into a further signal processing block which calculates a sliding window estimate of its mean and standard deviation. A low standard deviation is likely to indicate the presence of a steady, as opposed to a randomly varying, beat frequency, and hence the presence of an interference

component in the signal. The mean beat frequency is used rather than the raw value for later correction calculations as it has reduced noise. A threshold test is applied to the estimated standard deviation, where a low value indicates the presence of an interference frequency. Note that additional testing might include the ‘amplitude’ of the frequency modulation to ensure that the detection is not triggered by minor variations. At the same time, the estimated mean beat frequency is passed to an additional signal processing block, together with the frequency output of the first RST, in order to provide an improved estimate of the prime component frequency.

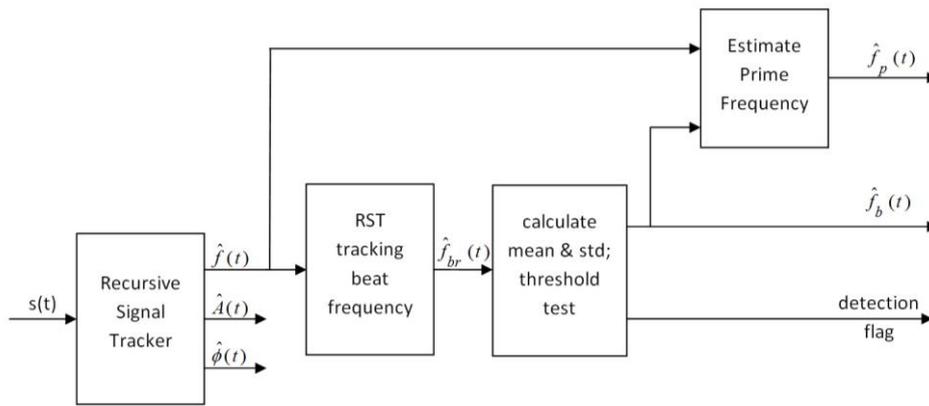


Figure 7. Signal processing scheme extended to detect interference signal

This can be achieved by calculating the moving average of the prime component frequency, where the moving average is calculated over the period of the mean beat frequency, in order to minimise the variation induced by the beat frequency.

Figure 8 shows the simulated output resulting from the signal processing scheme shown in Figure 7. The upper plot shows the calculated mean value of the raw beat frequency. Prior to the fault at  $t = 100$  s, the mean frequency shows random variation. After the onset of the fault, the mean beat frequency rapidly settles on 28 Hz. The middle plot shows the calculated standard deviation of the raw (n.b. not the mean) beat frequency. Prior to the onset of the fault, the standard deviation is typically around 10 Hz. After the fault, the standard deviation drops steadily, settling at around 0.1 Hz. A threshold level for detecting the onset of an interference component has been set at 0.8 Hz in this case. The lower plot shows the flag output of the diagnostic test, with two possible states: either the original signal is clean, or an Interference component (i.e. a fault) has been detected. As long as the standard deviation of the beat frequency remains above the selected limit of 0.8 Hz, the diagnostic state value is set to ‘Clean’. At approximately  $t = 100.4$  s, when the standard deviation of the beat frequency drops below the threshold, the flag is set to ‘Interference’.

Once the presence of an interfering component has been detected, additional Prism-based signal processing blocks may be created to estimate the

parameters of the fault and to provide a correction to the measurement. Figure 9 shows an extension of Figure 7 in which a Dynamic Notch Filtering block (as explained in [4]) is introduced to isolate and track both the Primary component and the Interference component. The Dynamic Notch Filtering block requires the input signal and the estimated frequencies of the two components.

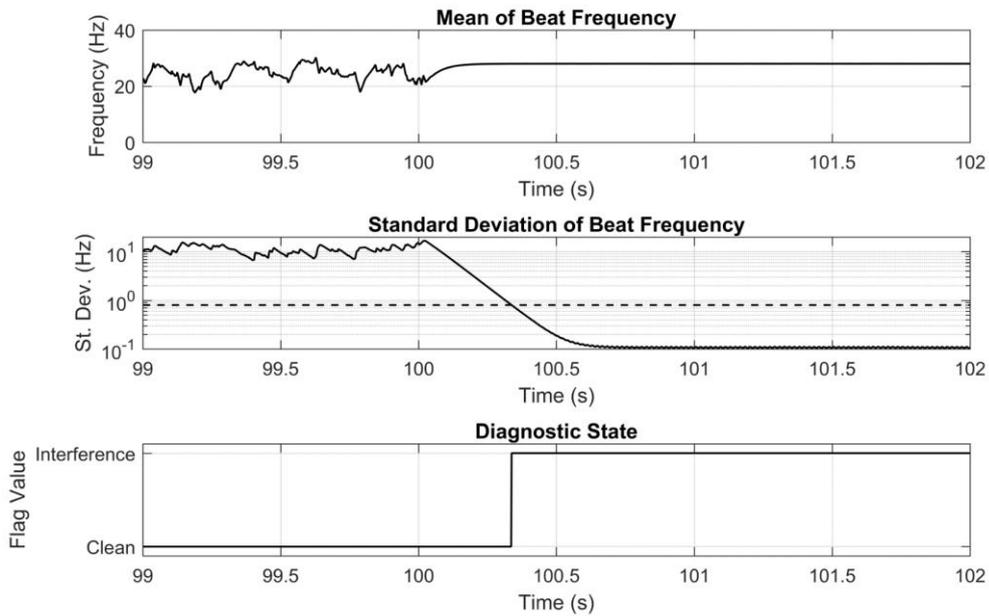


Figure 8. Simulation of onset of interference for signal processing scheme of Figure 7.

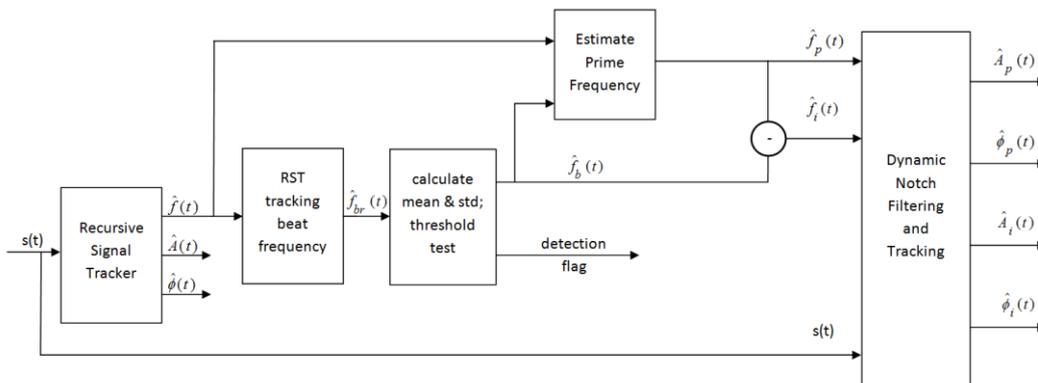


Figure 9. Signal processing scheme further extended to track and correct for interference signal.

Figure 10 shows the calculated frequency estimate of the Primary component generated by the signal processing scheme of Figure 9. The upper plot shows the time sequence: a step change in behaviour occurs at  $t = 100$  s, when the Interference component is manifest, and at approximately  $t = 100.4$  s when the correction is enabled. The lower plot shows the magnitude of the

frequency error on a logarithmic scale. Prior to the onset of the Interference component the frequency error is approximately within the range  $\pm 1e-4$  Hz; after the onset of the Interference component the frequency error range increases to approximately  $\pm 5e-2$  Hz; after the correction for interference is applied the frequency error range reduces to approximately  $\pm 5e-4$  Hz, demonstrating the effectiveness of the dynamic notch filtering correction.

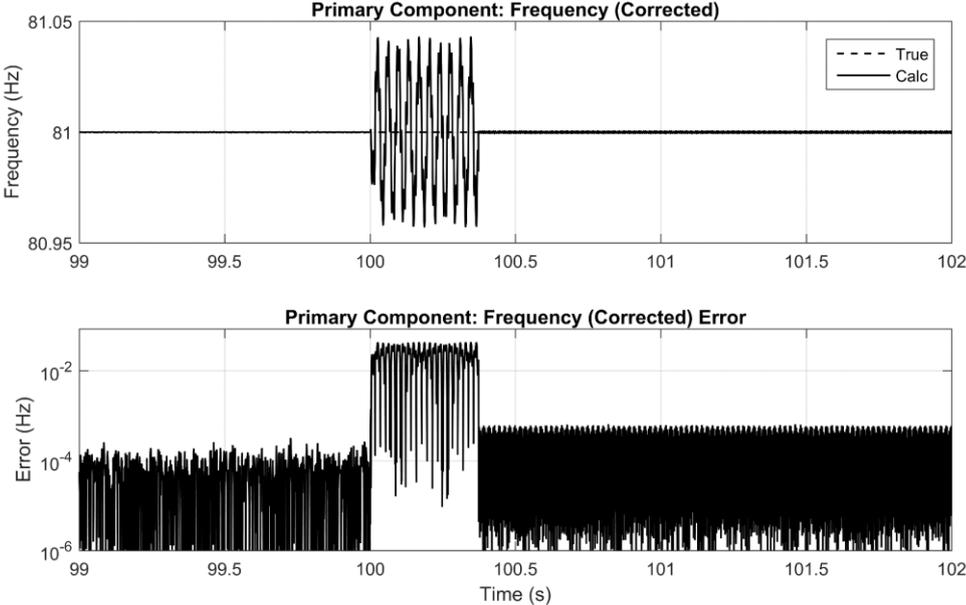


Figure 10. Corrected value of Primary Component frequency generated by signal processing scheme of Figure 9 (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

Similarly effective corrections are provided for frequency and phase. For example, Figure 11 shows the amplitude estimate of the Primary component. The upper plot shows the time sequence: changes in behaviour occur at  $t = 100$  s, when the Interference component is manifest, and at approximately  $t = 100.4$  s when the correction is enabled. The lower plot shows the magnitude of the amplitude error on a logarithmic scale. Prior to the onset of the fault the amplitude error is approximately  $\pm 5e-6$  V; after the onset of the fault the error increases to  $\pm 1e-3$  V; after the correction strategy is applied the error reduces to approximately  $\pm 1e-4$  V.

Figure 12 shows the estimate value of the frequency of the Interference component. In the upper plot the time sequences of the estimated and true values of the frequency are given. Both are zero before the onset of the interference component at  $t = 100$ s. Approximately 0.4 s elapses before the interference component is detected, the new signal processing blocks are instantiated, and an estimate of the frequency of the interference component is provided. The lower plot shows the error in the frequency estimate, which after  $t = 100.4$  s is within the approximate range  $\pm 1e-3$  Hz. Similar accurate tracking results are obtained

for the amplitude and phase of the Interference component arising from the dynamic notch filtering and tracking calculation.

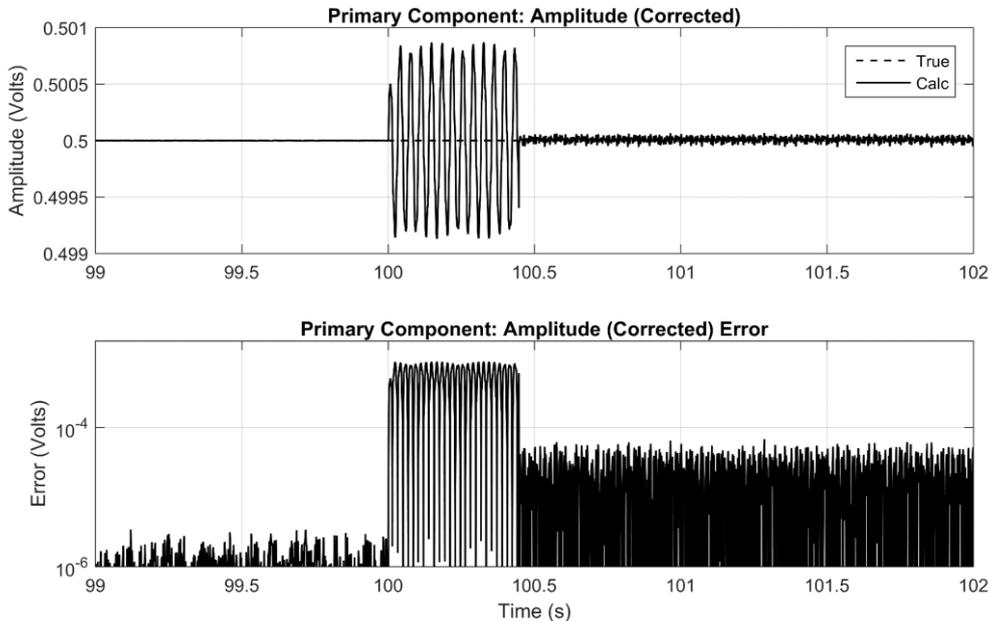


Figure 11. Corrected value of Primary Component amplitude generated by signal processing scheme of Figure 9 (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

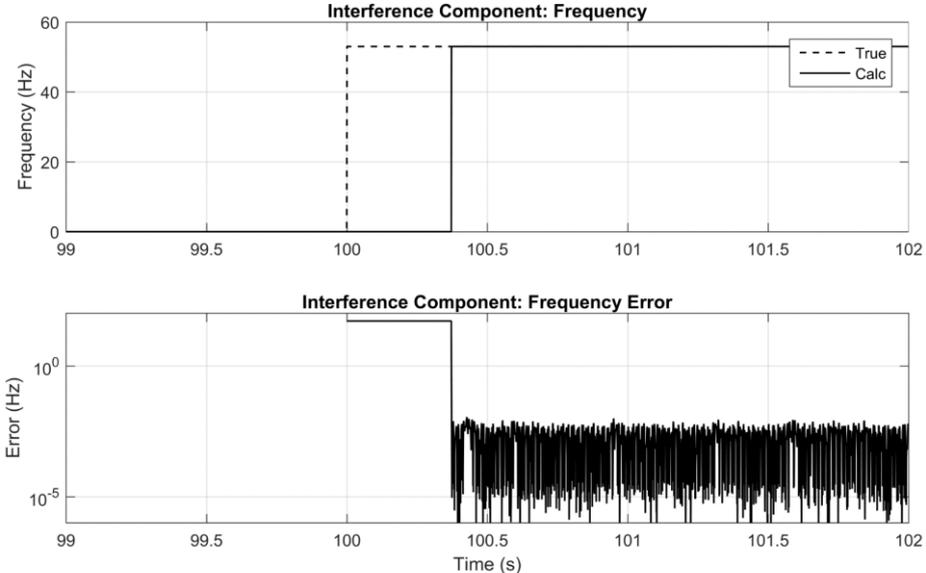


Figure 12. Estimated value of Interference Component frequency generated by signal processing scheme of Figure 9 (upper) and corresponding absolute error (lower) before and after onset of fault.

Once the signal processing scheme of Figure 9 is instantiated, it may continue to operate for as long as the fault is deemed to persist. For example if the amplitude of the Interference component drops below a certain threshold, or the standard deviation of the beat frequency rises above another threshold, it

may be determined by the system that the Interference component need no longer be tracked and the associated signal processing may be discontinued. Additionally, if it is deemed that the current signal processing scheme or associated parameters are no longer suited to tracking the current set of signal components, then new signal processing blocks may be instantiated to better match the current signal properties. Note that such instantiation and filter warmup may occur in parallel with the continued operation of the current signal processing arrangement in order to prevent any interruption in tracking function before switching to the new signal processing scheme.

### 3. Conclusions

The Prism is a new signal processing object which has the desirable properties of a recursive calculation and simple design. It is particularly well-suited to the new metrology challenges of the 21<sup>st</sup> Century, where the Internet of Things anticipates ubiquitous, adaptable and low cost sensing.

Because Prism design and instantiation is simple, a signal processing system can create additional processing blocks as required in response to newly detected conditions, as the sensor validation example illustrates. Furthermore, the ability to create Dynamic Notch Filtering blocks as a means of ameliorating the effects of unwanted components and/or tracking such components for the purpose of further diagnostic analysis, provides a powerful set of strategies that are suitable for implementation by automated systems. Additionally, because the design effort required to design new Prism-based signal processing is low (for example compared with conventional FIR filter design), it is possible to instantiate new Prism-based signal processing blocks in real time, selecting design parameters (e.g.,  $m$ ) to match the observed signal properties.

### References

1. L.D. Xu, W. He, and S.L. Wang, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. Vol. 10, issue 4. p. 2233–2243.
2. B. Vogel-Heuser, D. Hess. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2016. Vol 14, issue 2.
3. Sapozhnikova K.V., Henry M., Taimanov R.E. The need for standards for self-diagnosable and self-certifiable instrumentation, *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, No 6, pp 51-7, 2006.
4. M. Henry, O.Bushuev, O. Ibryaeva. “Prism Signal Processing for Sensor Condition Monitoring”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2017)*, Edinburgh, UK, June 2017.

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ С ФУНКЦИЕЙ ДООБУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ

Фетисов В.С., Харисова З.И.

*Уфимский государственный авиационный технический университет*

## **Введение**

Интеллектуализация средств измерений – одно из главных направлений в современной метрологии. Особенно заметны преимущества интеллектуализации в тех системах, которые предназначены для работы в технологических потоках, где важно непрерывное поддержание метрологической надежности.

Однако понимание термина «интеллектуальная измерительная система» до сих пор нельзя считать окончательно сформировавшимся. Существует два основных представления:

1) согласно ГОСТ Р 8.673-2009 «Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения», интеллектуальная измерительная система – это адаптивная измерительная система с функцией метрологического самоконтроля [1];

2) согласно теории искусственного интеллекта, интеллектуальная измерительная система – это система, которая для получения результата в той или иной степени имитирует работу какой-либо живой системы (например, нейросистемы человека, включая его головной мозг); при этом благодаря использованию элементов искусственного интеллекта такая измерительная система способна к обучению, анализу, принятию оптимальных решений и т.д.) [2].

Предлагаемая авторами система для поточных измерений гранулометрического состава суспензий является интеллектуальной с любой точки зрения – она не противоречит ни одному из указанных подходов.

## **1. Структура предлагаемой системы и алгоритм ее функционирования**

Проведение гранулометрического анализа суспензий является неотъемлемой частью технологического контроля во многих областях промышленности – химической, пищевой, нефтяной, лакокрасочной, фармацевтической и пр. Под гранулометрическим составом подразумевают процентное (долевое) распределение массы или числа частиц по их размерам (диапазонам размеров) [3]. Гранулометрические анализаторы часто должны работать в условиях технологического потока и обладать достаточным быстродействием, поскольку вовремя полученная

информация о текущем гранулометрическом составе суспензии может быть использована для оперативного изменения параметров работы технологического оборудования, таких устройств, как диспергаторы, мельницы, фильтры, центрифуги и т.д. с целью обеспечения качества конечного продукта.

Традиционными методами гранулометрического анализа являются кондуктометрический метод, разновидности ситовых и седиментационных методов и группа оптических методов: лазерная дифракция, нефелометрия, турбидиметрия, световая микроскопия [4]. Наиболее надежным способом определения размеров частиц для жидких дисперсных сред является микроскопический анализ, который сводится к использованию оптических (видеотехнических) средств, с помощью которых производят микрофотографирование исследуемых образцов, а затем обработку полученных изображений.

Представление результатов гранулометрического анализа сводится к построению кривых распределений частиц по размерам, которые наглядно описывают дисперсный состав и плотность распределения [5]. Пример представления результатов гранулометрического анализа суспензий показан на рис.1.

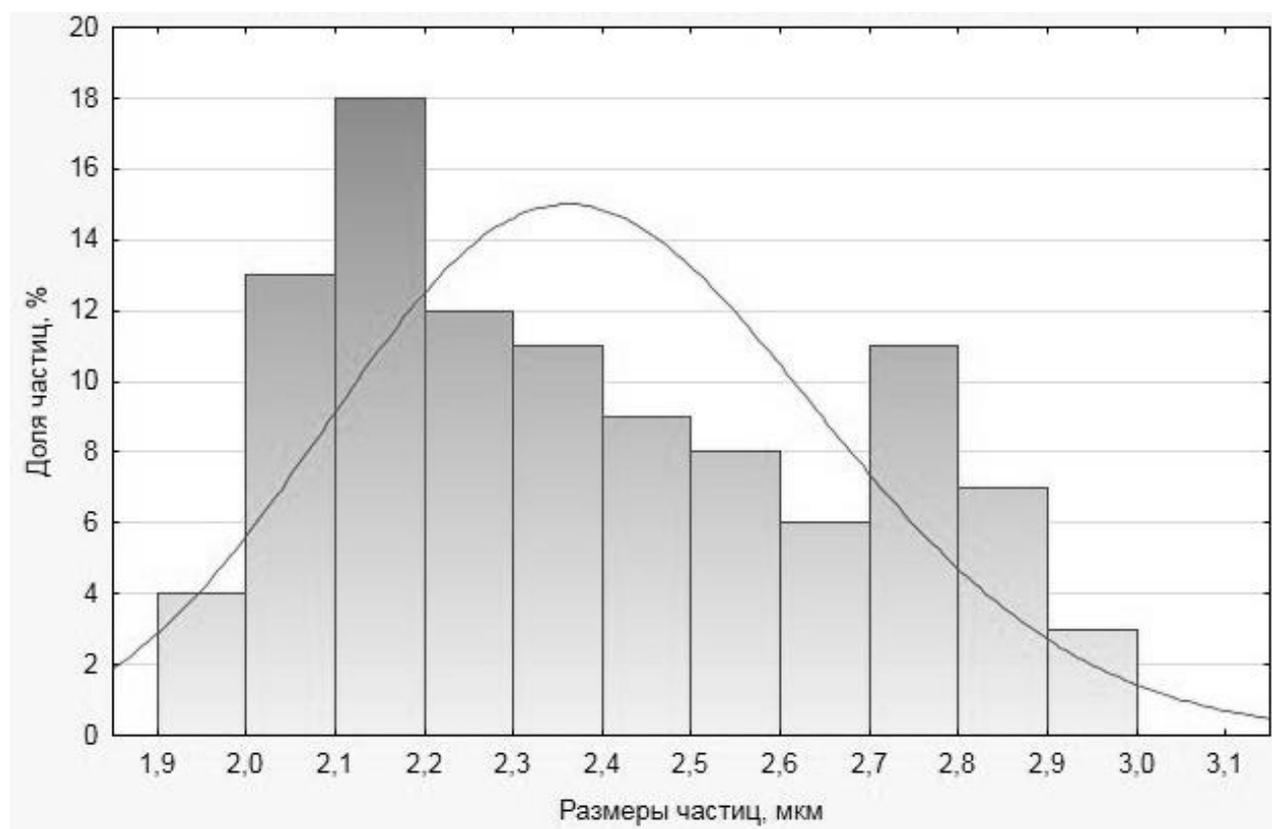


Рисунок 1. Гистограмма распределения частиц по размерам и дифференциальная кривая распределения

Каждая дифференциальная кривая распределения (если ограничиваться одномодовыми распределениями) однозначно характеризуется тремя коэффициентами: модой  $M_0$  (определяет положение максимума кривой), дисперсией  $D_0$  (определяет ширину распределения) и коэффициентом асимметрии  $K_a$  (определяет степень несимметричности кривой относительно ее пика). Авторы в данной работе ограничились одномодовым представлением распределений частиц по размерам, так как для контроля большинства технологических процессов это вполне приемлемо.

В лабораторных условиях получить результаты гранулометрического анализа не сложно, однако в условиях технологического потока требуются специальные меры, обеспечивающие метрологическую надежность и быстроедействие.

Быстроедействие предлагаемой системы обеспечивается за счет использования постоянно работающего нефелометрического анализатора на основе проточной измерительной камеры с прозрачной стенкой и видеокамеры, установленной перед ней [6]. В центр измерительной камеры подведен жесткий световод, вводящий в среду зондирующее лазерное излучение. Картина рассеянного излучения, обусловленная в большой степени характером распределения частиц по размерам, периодически регистрируется видеокамерой. Примеры соответствия картин рассеяния и графиков распределения частиц по размерам приведены в табл.1.

Таким образом, необходимо быстро отображать вектор изображения (вектор яркостей пикселей фотоматрицы размерностью  $N \times M$ ) в трехкоординатный вектор коэффициентов распределения ( $M_0$ ,  $D_0$ ,  $K_a$ ). Удобнее всего это делать с помощью искусственной нейросети (ИНС). В измерительной технике в последние десятилетия ИНС находят все большее применение, позволяя заменить операции вычисления градуировочных зависимостей обучением системы на примерах. Но в предлагаемой системе ИНС выполняет роль не просто преобразователя, отображающего входной вектор в выходной. Она играет важную роль в процессе метрологического самоконтроля, который при определенных условиях может инициироваться и переключать ИНС в режим обучения. Это дополнительное обучение (не связанное с начальной градуировкой) происходит на основе объективных результатов, получаемых посредством микроскопического анализа.

Структура предлагаемой системы приведена на рис.2.

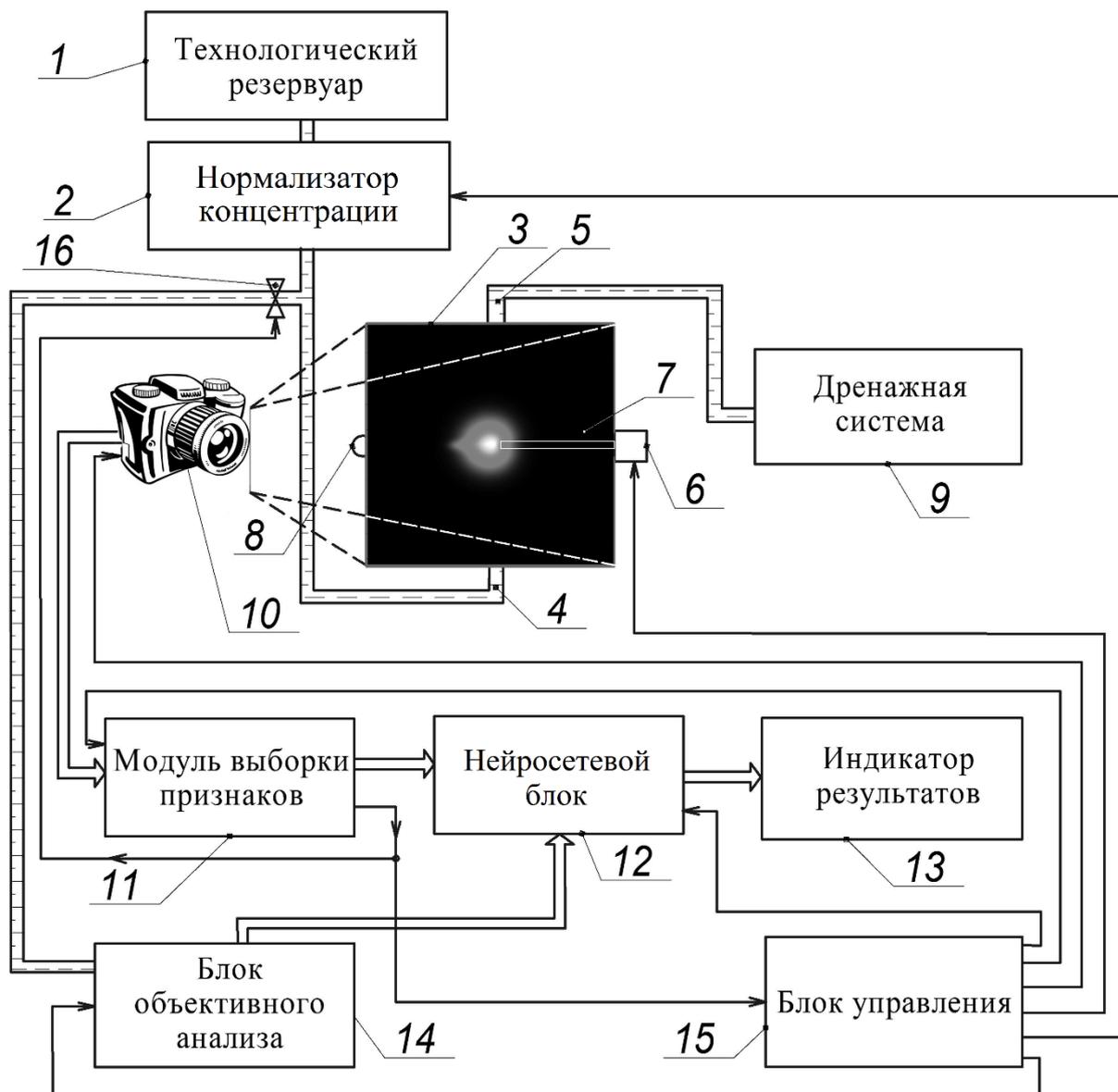


Рисунок 2. Структура измерительной системы для поточного гранулометрического анализа суспензий

Система может работать в режиме обучения (здесь надо различать предварительное обучение – начальную градуировку и дополнительное обучение – режим метрологического самоконтроля) и текущих измерений. В режиме предварительного обучения из технологического резервуара 1 последовательно подается несколько жидких образцов с известным и сильно различающимся гранулометрическим составом. Каждый образец проходит через нормализатор концентрации 2, который по сигналу с блока управления 15 производит разбавление поступающей пробы и доведение ее концентрации до определенного стандартного значения. Затем суспензия поступает в камеру 3, а оттуда вытекает в дренажную систему 9.

Под действием сигнала с блока управления лазер 6 просвечивает исследуемую среду лучом, рассеиваемым в разных направлениях. Прямой падающий луч попадает в световую ловушку 8, которая предотвращает отражение луча обратно в камеру от ее стенки. Картина рассеяния, зависящая от распределения частиц по размерам, снимается цифровой фотокамерой 10 и в виде массива значений яркости пикселей ее фотоматрицы поступает в модуль выборки признаков 11, который формирует набор наиболее характерных признаков изображения. Если модуль выборки признаков 11 обнаруживает набор признаков, сильно отличающихся от уже известных и хранящихся в его памяти, тогда открывается вентиль 16, который обеспечивает поступление анализируемой жидкости в блок объективного анализа 14 (в этом блоке реализуется микроскопический анализ в автоматическом, полуавтоматическом или даже ручном режиме). По завершении анализа числовые результаты, характеризующие распределение частиц по размерам, передаются в нейросетевой блок 12 для его обучения. Результаты поступают на индикатор результатов 13, где отображается диаграмма распределения частиц по размерам. После тренировки сети на всех базовых образцах цикл предварительного обучения заканчивается.

В основном режиме работы (режиме текущих измерений) все описанные блоки работают аналогично, с той лишь разницей, что блок объективного анализа 14 большую часть времени находится в режиме ожидания, а нейросетевой блок 12 производит практически мгновенные преобразования вектора сигналов с модуля выбора признаков 11 в результат гранулометрического анализа посредством обученной ранее искусственной нейросети. И только в некоторые отдельные моменты времени, когда модуль выборки признаков 11 для поступающего на его вход изображения обнаруживает новый набор признаков, он формирует управляющий сигнал для проведения метрологического самоконтроля - нового объективного (микроскопического) анализа, после которого производится дополнительное обучение системы с учетом нового образца. Такие операции дополнительного обучения ИНС способствуют постепенному увеличению точности и метрологической надежности гранулометрического анализа.

## **2. Результаты экспериментов. Обучение искусственной нейросети**

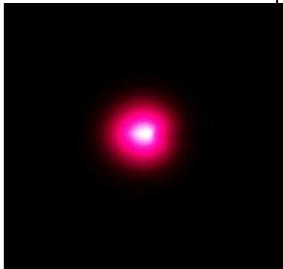
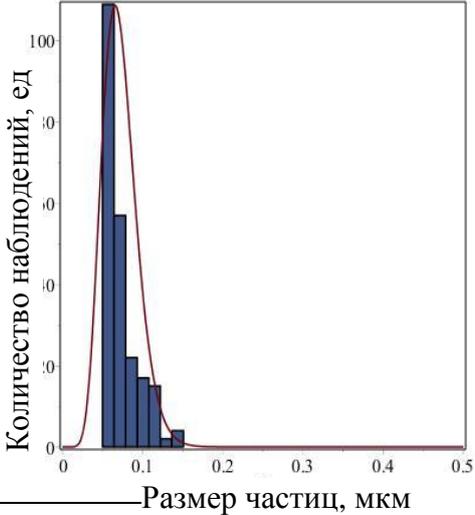
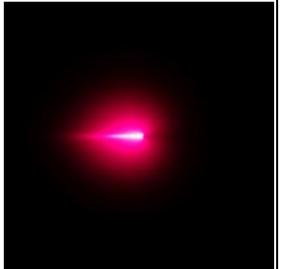
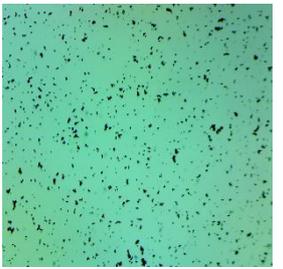
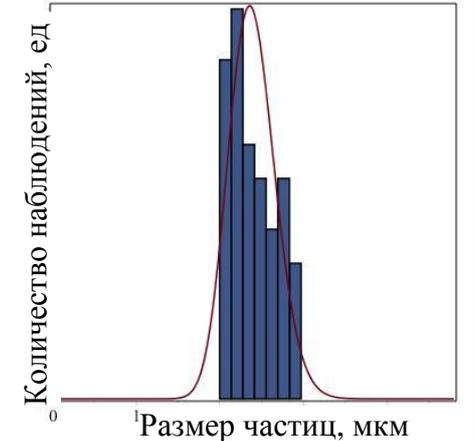
В экспериментах исследовались водные суспензии синтетических алмазных порошков различных фракций. Образцы поочередно исследовались в проточной измерительной камере, для каждого из образцов были зафиксированы картины рассеяния, с помощью цифрового микроскопа Trinocular MZJG160C фирмы AmScope (Эмекон, США) были

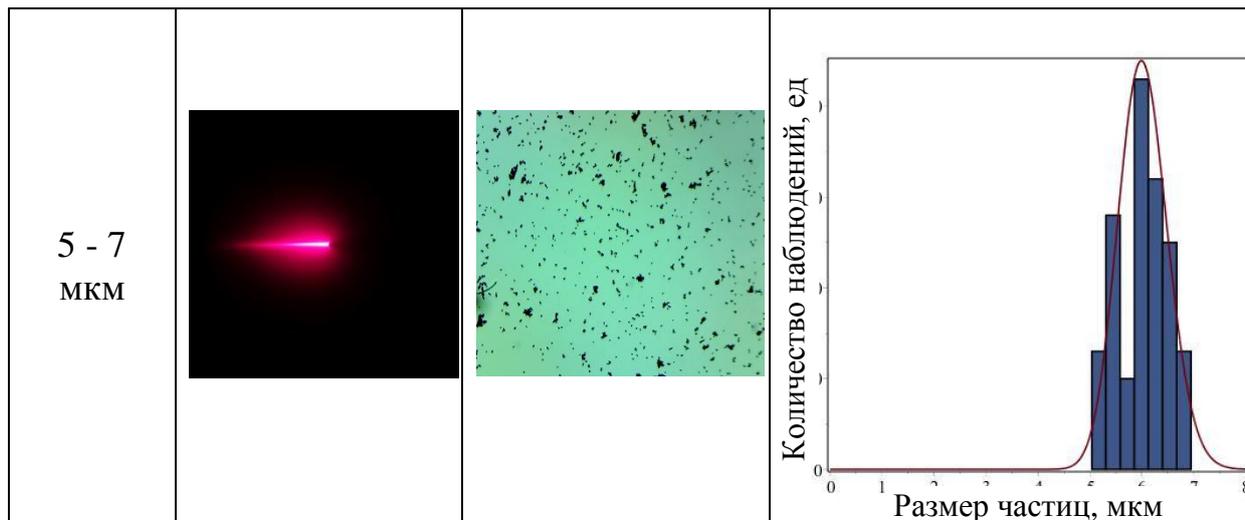
сделаны микроскопические снимки. Полученные снимки обрабатывались в среде разработки LabView с использованием модуля видеообработки LabVIEW Vision Development Module. По снимкам производился подсчет количества и размеров частиц.

По полученным данным строились гистограммы распределения частиц по размерам, а также дифференциальные кривые распределения частиц для каждого из образцов. По полученным снимкам были определены параметры распределения частиц для дальнейшего нейросетевого обучения системы: мода  $M_0$ , дисперсия  $D_0$  и коэффициент асимметрии  $K_a$ .

В качестве обработчика отснятых фотоснимков использовалась нейросеть типа MLP (многослойный персептрон), алгоритм обучения – Back Propagation. [7].

Таблица 1 – Примеры соответствия картин рассеяния и графиков распределения частиц по размерам

Диапазон размеров частиц	Картина рассеяния света	Микроскопический снимок	Распределение частиц по размерам
0 - 0.5 мкм			
2 - 3 мкм			



Для получения параметров яркости по полученным снимкам в среде LabView был написан скрипт, который позволяет определять значения яркости пикселей в 180 особых точках (рис.3). Полученные значения яркости в особых точках являлись входными переменными для ИНС. Мода  $M_0$ , дисперсия  $D_0$  и коэффициент асимметрии  $K_a$  являлись выходными переменными.

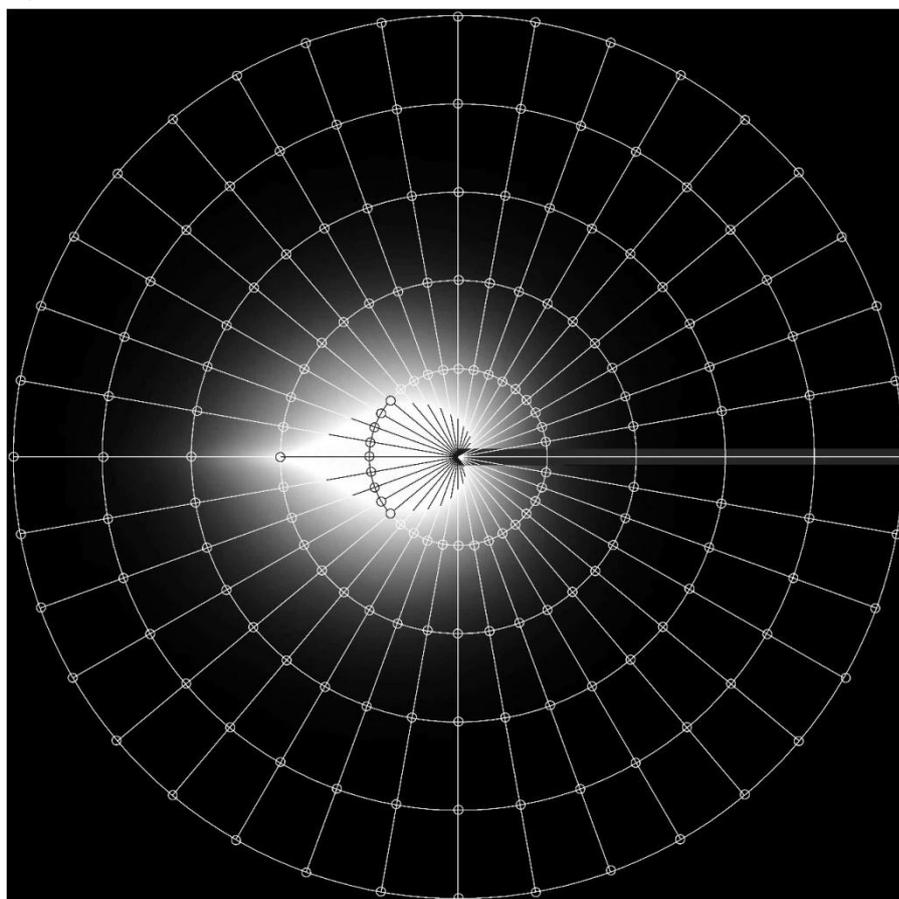


Рисунок 3 – Особые точки для определения яркости пикселей в области рассеяния излучения

Процесс обнаружения нового изображения, при котором должен запуститься процесс дополнительного обучения, происходит по специальному алгоритму сравнения текущих значений входных переменных нейросети с уже имеющимися в памяти и сводится к определению показателя сходства, вычисляемого как сумма квадратов разностей значений яркости пикселей в одних и тех же особых точках. Минимальное значение этого показателя свидетельствует о наибольшем сходстве двух сравниваемых векторов.

Показатель сходства сравнивается с пороговым значением, выбор которого зависит от требуемой точности и приемлемой частоты выполнения дообучения нейросети. В случае превышения порогового значения показателя сходства модулем выборки признаков формируется сигнал о том, что обнаружен неизвестный образец и требуется провести микроскопический анализ образца и дополнительное обучение системы. При этом запускается блок объективного анализа, с помощью которого полученная проба подробно анализируется и определяются значения  $M_0$ ,  $D_0$  и  $K_a$  для нового цикла обучения. Они записываются в память нейросети в качестве выходных переменных.

Рассмотрим пример, показывающий эффективность дополнительного обучения ИНС в процессе работы. Пусть на вход нейросети поступил входной вектор, соответствующий новому образцу с ранее не встречавшимся гранулометрическим составом. Этот состав подвергся микроскопическому анализу, и для него были определены следующие параметры распределения:  $M_0=40.50$ ,  $D_0=20.21$ ,  $K_a=34.34$ . Если использовать ранее обученную сеть без дополнительного обучения, то она выдает результат с довольно большой погрешностью:  $M_0=35.86$ ,  $D_0=27.98$ ,  $K_a=20.48$ . После дообучения сети исследуемый образец был рассмотрен повторно, после чего нейросеть выдала гораздо более близкие к реальным результатам ( $M_0 = 40.88$ ,  $D_0 = 20.09$ ,  $K_a = 34.24$ ). Эффективность дополнительного обучения нейросети в процессе работы показана в Таблице 2.

Таблица 2 – Результаты анализа до и после дополнительного обучения нейросети

Параметры распределения	Результат микроскопического анализа	Результат до доп. обучения		Результат после доп. обучения	
			$\delta, \%$		$\delta, \%$
Мода $M_0$	40,50	35,86	12,94	40,88	0,93
Дисперсия $D_0$	20,21	27,98	27,77	20,09	0,60
Коэффициент асимметрии $K_a$	34,34	30,48	12,96	34,24	0,29

Таким образом, результат анализа после дополнительного обучения значительно ближе к результату микроскопического анализа.

В качестве альтернативных алгоритмов обучения нейросети были рассмотрены следующие распространенные и применимые для рассматриваемой задачи методы [8]:

- метод обратного распространения (Back propagation) – наиболее распространенный алгоритм обучения многослойных нейросетей;
- метод быстрого распространения (Quick Propagation) – модификация метода обратного распространения;
- метод спуска по сопряженным градиентам (Conjugate Gradients Descent) – алгоритм обучения более быстрый и простой в плане подбора параметров обучения (количество эпох, скорость обучения, инерция и пр.), по сравнению с методом обратного распространения.

В Таблице 3 представлены результаты сравнения работы перечисленных алгоритмов.

Таблица 3 – Результаты сравнения алгоритмов обучения нейросети

№ опыта	Результат объективного анализа	Метод Back Propagation		Метод Quick Propagation		Метод Conjugate Gradients Descent		
		Результат	Отклонение	Результат	Отклонение	Результат	Отклонение	
1	M <sub>0</sub>	24,742	24,856	0,114	24,907	0,165	24,921	0,179
	D <sub>0</sub>	7,004	7,028	0,024	7,484	0,48	7,035	0,031
	K <sub>a</sub>	0,21391	0,232	0,018	0,241	0,027	0,235	0,021
2	M <sub>0</sub>	0,977	0,979	0,002	1,016	0,039	1,118	0,141
	D <sub>0</sub>	0,352	0,355	0,003	0,395	0,043	0,377	0,025
	K <sub>a</sub>	1,214	1,217	0,003	1,357	0,143	1,225	0,011
3	M <sub>0</sub>	2,389	2,392	0,003	2,479	0,09	2,486	0,097
	D <sub>0</sub>	0,076	0,09	0,014	0,092	0,016	0,096	0,02
	K <sub>a</sub>	0,231	0,236	0,005	0,239	0,008	0,244	0,013

Было проведено 3 опыта, в каждом из которых для образца суспензии производилась съемка картины рассеяния, затем выполнялся микроскопический анализ с определением коэффициентов M<sub>0</sub>, D<sub>0</sub>, K<sub>a</sub>, после чего выполнялось обучение ИНС. По результатам 10 запусков сети, обученных разными методами, вычислялись средние расчетные значения коэффициентов и вычислялись соответствующие отклонения.

Как видно, наименьшее отклонение от результата объективного анализа показал метод обратного распространения, по этой причине в качестве основного метода обучения в работе использовался именно он.

## Заключение

Предлагаемая система обладает быстродействием поточного нефелометрического анализатора на основе простой измерительной камеры с зондирующим лазерным излучением и видеокамеры и, в то же время, высокой метрологической надежностью, поддерживаемой за счет подключаемого по мере необходимости объективного (микроскопического) средства анализа.

Обученная при начальной градуировке на нескольких образцовых суспензиях ИНС в процессе работы, по сути, является средством быстрого отображения вектора входных сигналов, получаемых из картин рассеяния света в измерительной камере, в вектор параметров распределения частиц по размерам. Дополнительное обучение ИНС в процессе работы способствует постепенному улучшению точностных характеристик системы и поддержанию достоверности гранулометрического анализа.

## Литература

1. ГОСТ Р 8.673-2009 "Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения". Доступно на сайте:  
<http://vsegost.com/Catalog/49/49914.shtml>
2. Bellman R. E. An Introduction to Artificial Intelligence: Can Computers Think, Boyd & Fraser Publishing Company, San Francisco, 1978.
3. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1987. – 264 с., с.11.
4. Xu, R., 2002, Particle Characterization: Light Scattering Methods, Kluwer Academic Publishers, p.14.
5. Ходаков, Г. С. Основные методы дисперсионного анализа порошков / Г. С. Ходаков. - М. : Стройиздат, 1968. — 199 с., с.10
6. Харисова З.И., Фетисов В.С. Система для экспрессного определения гранулометрического состава суспензий на основе видеотехнических средств и искусственной нейросети, дообучаемой в процессе работы // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. с.57-64.
7. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей/ Р. Каллан. — Москва, Санкт-Петербург, Киев: Издательский дом «Вильямс», 2001. — 287 с., с.15.
8. Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H., and De Jesús, O., "Neural Network design," 2nd ed., p.11-7,12-14

# ПОВЫШЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ДОСТОВЕРНОСТИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ, ВЫПОЛНЯЕМЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИМИ УРОВНЕМЕРАМИ

А.А. Калашников

*АО «АТОМТЕХЭНЕРГО»*

[alexander\\_ak1987@mail.ru](mailto:alexander_ak1987@mail.ru)

В настоящей статье рассматриваются гидростатические измерения уровня жидких сред в аспекте многопараметрических измерений. Такое нестандартное рассмотрение данного вида измерений позволило разработать новые методы по повышению метрологической достоверности промышленных гидростатических уровнемеров. Причем под метрологической достоверностью в данной статье понимается не только повышение точности измерений, но и надежность ее сохранения в период эксплуатации.

Для обеспечения достоверных измерений уровня, в том числе в условиях быстрых переходных процессов, разработан алгоритм обработки измерительных сигналов гидростатических уровнемеров, который обеспечивает высокую точность коррекции показаний с учетом множества параметров рабочей среды. Методы коррекции показаний на основе разработанного алгоритма были внедрены в атомной энергетике России.

Помимо коррекции показаний алгоритм обеспечивает и выполнение on-line мониторинга для идентификации всех возможных дефектов измерительных каналов уровня, включая скрытые дефекты, которые не выявляются посредством штатных средств АСУТП или в процессе регламентных процедур технического обслуживания.

Настоящая статья содержит описание данного алгоритма и его применение в задачах коррекции показаний и on-line мониторинга метрологической исправности измерительных каналов уровня в условиях непрерывного технологического процесса.

## **Введение**

На первый взгляд может показаться, что гидростатические измерения уровня жидкой среды являются простыми измерениями в промышленности. Однако данное понимание справедливо только в идеализированном случае измерений уровня однофазной рабочей среды со стационарными теплофизическими характеристиками. В действительности, в ходе технологического процесса теплофизические характеристики среды изменяются в довольно большом диапазоне. Например, в атомной и тепловой энергетике температура изменяется от 25 °С до 370 °С, давление – от 100 кПа до 16,5 МПа; рабочей средой является двухфазная среда (вода-пар), достигающая состояния насыщения. Такие изменения приводят к сложным физико-химическим межфазовым

процессам, протекающим в условиях больших массовых переносов пароводяной смеси. При этом сама граница раздела сред (пар-вода) является нечеткой как в вертикальном, так и в горизонтальном сечении, поэтому абсолютно точно выразить уровень воды мерой длины является крайне затруднительным.

При использовании гидростатических уровнемеров непосредственно определяется именно «весовая характеристика» уровня. Типовая промышленная гидростатическая схема измерений уровня с применением однокамерного уравнительного сосуда (УСО) приведена на рисунке 1.

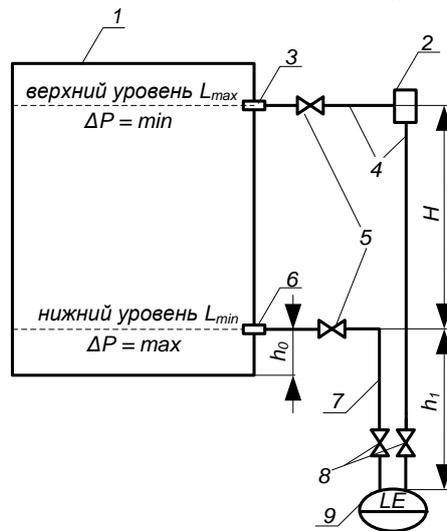


Рисунок 1. Измерение уровня воды в технологической емкости под давлением с применением однокамерного уравнительного сосуда

На рисунке:

1 – технологическая емкость под давлением; 2 – однокамерный уравнительный сосуд (УСО); 3 – штуцер (врезка плюсовой импульсной линии); 4 – плюсовая импульсная линия (трубная проводка); 5 – коренные вентили; 6 – штуцер (врезка минусовой импульсной линии); 7 – минусовая импульсная линия; 8 – отсекающие вентили; 9 – датчик разности давлений (ДД);  $\Delta P$  – измеряемый перепад давлений;  $h_1$  – высота импульсных линий до нижнего штуцера;  $H$  – база уровнемера;  $h_0$  – расстояние от внутренней образующей дна емкости до нижнего штуцера;  $L_{max}$  – максимальное измеряемое значение уровня;  $L_{min}$  – значение уровня, соответствующее высоте нижнего штуцера.

При данной схеме измерений уравнительному сосуду сообщается давление/разрежение со стороны технологической емкости, и на датчике разности давлений (ДД) в общем случае возникает перепад:

$$\Delta P = P_{\Sigma''+'''} - P_{\Sigma''-'''} = P_{вн} + P_{ил1} - P_{воды} - P_{пара} - P_{вн} - P_{ил2}$$

где  $\Delta P$  – измеряемый перепад давлений;

$P_{\Sigma''+'''}$  – общее давление, оказываемое со стороны плюсовой линии;

$P_{\Sigma''-'''}$  – общее давление, оказываемое со стороны минусовой линии;

$P_{вн}$  – давление/разрежение внутри технологической емкости;

$P_{\text{ил1}}$  – гидростатическое давление, создаваемое столбом воды в плюсовой импульсной линии и УСО;  
 $P_{\text{воды}}$  – гидростатическое давление воды в технологической емкости,  
 $P_{\text{пара}}$  – гидростатическое давление пара в технологической емкости,  
 $P_{\text{ил2}}$  – гидростатическое давление воды в технологической емкости.

Указанные в формуле измеряемые параметры давления зависят от ряда других теплофизических параметров, основными из которых являются: плотность воды и водяного пара внутри технологической емкости, плотность воды в плюсовой и минусовой импульсных линиях. Для того чтобы подробнее рассмотреть влияние данных параметров на результаты измерений, распишем формулу в следующем виде:

$$\Delta P = \rho_{\text{ил1}} \cdot g \cdot H + (\rho_{\text{ил1}} - \rho_{\text{ил2}}) g h_1 - (\rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H - L)), \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{ил1}}$  – плотность воды в плюсовой импульсной линии и УСО,  
 $g$  – местное ускорение свободного падения,  
 $H$  – база датчика уровня,  
 $\rho'$  – плотность воды внутри технологической емкости,  
 $\rho''$  – плотность паровоздушной смеси внутри технологической емкости,  
 $\rho_{\text{ил2}}$  – плотность воды в минусовой импульсной линии и УСО,  
 $h_1$  – высота импульсных линий до нижней врезки,  
 $L$  – искомый уровень воды в технологической емкости.

Значения плотности воды и пара, входящие в формулу (2), в основном зависят от распределения давления  $P_{\text{вн}}$  и температуры  $T_{\text{вн}}$  внутри технологической емкости, а также от распределения температурного поля  $T_{\text{ил}}$  в импульсных линиях. Зависимость плотности воды и водяного пара описывается уравнениями IAPWS [1, 2].

В энергетике при изменении параметров давления  $P_{\text{вн}}$  и температуры  $T_{\text{вн}}$  плотность воды в ходе технологического процесса снижается с  $998 \text{ кг/м}^3$  до  $590 \text{ кг/м}^3$ , плотность пара возрастает до  $130 \text{ кг/м}^3$  (при температуре  $347 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Такие изменения параметров неизбежно приводят к изменению показаний гидростатических уровнемеров, и требуется непрерывно вносить соответствующую коррекцию.

Когда температура рабочей среды в технологической емкости равна температуре окружающего воздуха, соответствующая шкала измерений, обеспечивающая достоверность показаний, условно называется «холодной». Когда температура рабочей среды выше температуры окружающего воздуха – соответствующая шкала измерений условно называется «горячей».

Для того чтобы в динамике выполнять корректировку показаний гидростатических уровнемеров от «холодной» шкалы к «горячей»,

выведем формулы для поправочных коэффициентов на «горячую» шкалу с учетом изменений вышеуказанных параметров рабочей среды и технических характеристик самого измерительного канала.

### **Вывод формул для поправочных коэффициентов на «горячую» шкалу**

В случае «холодной» шкалы плотность рабочей среды в технологической емкости и импульсных линиях (1 и 2) одинаковы:

$$\rho_{ил1} = \rho_{ил2} = \rho_{хш},$$

где  $\rho_{хш}$  – плотность воды в технологической емкости, соответствующая случаю «холодной» шкалы.

С учетом данного условия уравнение (1) для «холодной» шкалы имеет вид:

$$\Delta P = (H - L_{хш}) \cdot g \cdot \rho_{хш} \quad (2)$$

где  $L_{хш}$  – уровень воды в технологической емкости для случая «холодной» шкалы,

Для того чтобы расписать уравнение (1) для случая «горячей» шкалы, дополнительно учтем распределение плотности среды по высоте импульсных линий.

Зачастую на практике плотность среды в плюсовой импульсной линии (ИЛ) считают одинаковой на протяжении всей ее высоты. Также обычно принимают одинаковыми значения плотности среды в минусовой и плюсовой линиях. Однако ввиду удаленности ИЛ друг от друга значения температуры и плотности среды в них могут отличаться, что приводит к дополнительной погрешности измерительного канала (ИК). Подтверждается это и результатами инженерных и научных работ, описывающих неравномерности распределения температурного поля по высоте ИЛ на объектах энергетики [3].

Из вышеуказанного следует, что плотность среды в ИЛ датчиков некорректно принимать одинаковой без проведения соответствующей пирометрии. Причем, даже зная результаты пирометрии, вывод непрерывной функции распределения плотности по высоте ИЛ в каждом конкретном случае является нетривиальной и трудозатратой задачей. В связи с этим, для универсальности и упрощения метода расчета плотности среды выделим участки по высоте ИЛ, на протяжении каждого из которых тепло-химические характеристики среды допустимо считать одинаковыми (пояснительный рисунок 2).

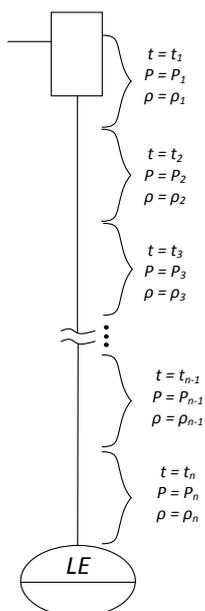


Рисунок 2. Схема деления ИЛ на участки с одинаковыми характеристиками среды

Тогда, суммарное давление гидростолба в ИЛ можно определить следующим образом:

$$P = g \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot h_i, \quad (3)$$

где  $\rho_i$  – плотность воды на участке  $i$ ,

$h_i$  – высота участка  $i$ ,

$P$  – суммарное давление гидростолба ИЛ.

Плотность каждого из участков ИЛ определяется из справочных данных [4] при соответствующих значениях температуры  $t_i$  и давления  $p_i$ . В свою очередь, давление на участке  $i$  складывается из давления внутри технологической емкости  $P_{\text{вн}}$  и суммы гидростатических давлений вышестоящих участков в ИЛ. Таким образом, расчет суммарного давления гидростолба в ИЛ по формуле (3) осуществляется от верхних участков к нижним.

С учетом условия (3) уравнение (1) для «горячей» шкалы преобразуется к виду:

$$\Delta P = g \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H-L) \quad (4)$$

где  $H_i$  – длина участка  $i$  плюсовой ИЛ в пределах фактической базы ИК уровня ( $\sum_{i=1}^n H_i = H$ ),

$h_j$  – длина участка  $j$  плюсовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ( $\sum_{j=1}^m h_j = h_1$ ),

$h_\gamma$  – длина участка  $\gamma$  минусовой ИЛ в пределах ее высоты до минусового отбора импульса ( $\sum_{\gamma=1}^k h_\gamma = h_1$ ).

Так как используемые переменные в уравнении (4) удовлетворяют переменным в уравнении (2), то справедлива система:

$$\Delta P = (H - L_{\text{хш}}) \cdot g \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}''),$$

$$\Delta P = g \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_{\gamma} - \rho' \cdot g \cdot L + \rho'' \cdot g \cdot (H - L)$$

где  $\Delta P \in [g \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_{\gamma} - \rho' \cdot g \cdot H;$

$$g \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_{\gamma} - \rho'' \cdot g \cdot H];$$

$L_{\text{хш}} \in [0; H], L \in [0; H]$  – ограничения из физического смысла.

Решая систему относительно  $L$ , получим функции коррекции показаний на «горячую» шкалу в следующем виде:

$$L = \frac{L_{\text{хш}} \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'') - H \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'' + \rho'') + \sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_{\gamma}}{\rho' - \rho''}$$

Для упрощения процедур промышленных расчетов удобно использовать полученную функцию, преобразованную к виду:

$$L = k \cdot L_{\text{хш}} + b, \tag{5}$$

где поправочные коэффициенты  $k$  и  $b$  вычисляются по формулам:

$$k = \frac{(\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'')}{\rho' - \rho''},$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_{\gamma} - H \cdot (\rho_{\text{хш}}' - \rho_{\text{хш}}'' + \rho'')}{\rho' - \rho''}.$$

Так как вывод полученных расчетных формул для поправочных коэффициентов  $k, b$  произведен на области определения  $L_{\text{хш}} \in [0; H]$  и  $L \in [0; H]$ , то их применение на практике справедливо, когда на промышленном объекте за показания уровня «0 мм» принято считать уровень врезки минусовой импульсной линии.

Когда на промышленном объекте за показания уровня «0 мм» принимается уровень дна технологической емкости, то при расчетах поправочных коэффициентов необходимо дополнительно учитывать смещение шкалы измерений на высоту  $h_0$  (см. рис 1). Тогда, с учетом смещения на высоту  $h_0$  функция пересчета (5) преобразуется к виду:

$$L = k \cdot (L_{\text{хш}} - h_0) + b + h_0.$$

или:

$$L = K \cdot L_{\text{хш}} + B,$$

где  $K = k;$

$$B = -k \cdot h_0 + b + h_0.$$

Полученные расчетные формулы для поправочных коэффициентов  $K$ ,  $B$  позволяют выполнить корректировку показаний ИК уровня на «горячую» шкалу для различных режимов работы технологического оборудования и любых технических характеристик ИК.

### Динамическая коррекция показаний

С целью динамической коррекции показаний уровня в программно-технических комплексах (ПТК) АСУТП на основе ранее выведенных зависимостей предлагается рассчитывать поправочные коэффициенты  $K$ ,  $B$  с учетом текущих значений плотности воды и водяного пара. Определение плотности воды и водяного пара в режиме реального времени осуществляется по данным справочника [4], или, более сложно, на основании [2]. Исходными данными для расчетов плотности и в том и в другом случае являются соответствующие текущие показания датчиков давления и температуры в технологической емкости (рис. 3).

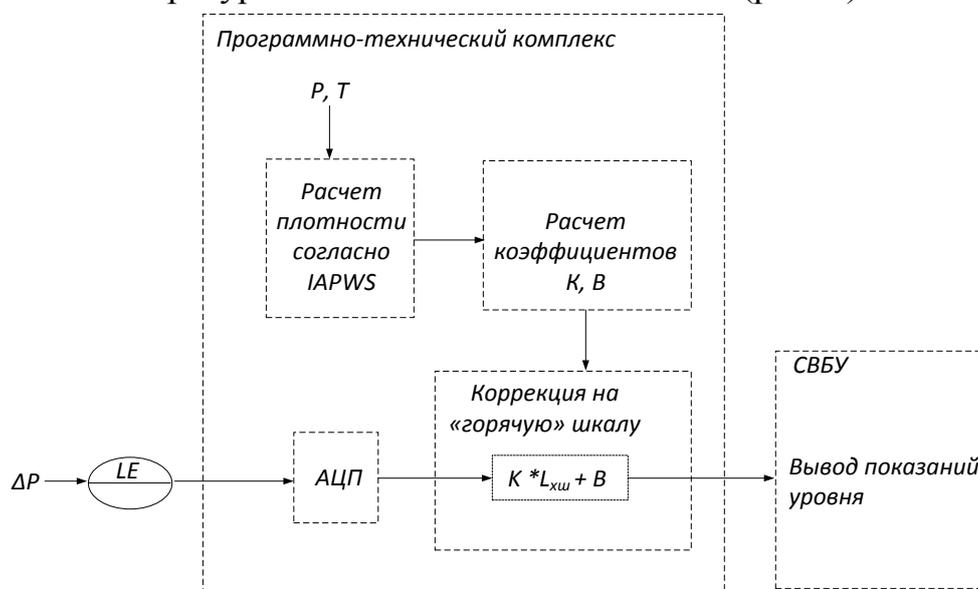


Рисунок 3. Предлагаемая схема динамической коррекции показаний уровня

На рисунке:  $\Delta P$  – измеряемый перепад давлений;  $LE$  - датчик разности давлений, настроенный на «холодную» шкалу (согласно ГОСТ 22520-85);  $P$  – текущее значение давления в технологической емкости;  $T$  – текущее значение температуры в технологической емкости; СВБУ - система верхнего блочного уровня.

Данный способ динамической коррекции обеспечивает достоверность показаний измерительных каналов во всех возможных режимах работы технологического оборудования, в том числе при переходных процессах. Внедрение данного метода позволило снизить максимальную приведенную погрешность гидростатических уровнемеров в переходных режимах работы энергоблоков АЭС до 3 %.

## Применение разработанного алгоритма обработки измерительных сигналов для задач on-line мониторинга ИК

Разработанный алгоритм по обработке измерительных сигналов гидростатических уровнемеров позволяет осуществлять моделирование виртуального датчика уровня для выполнения on-line мониторинга метрологической исправности ИК. Особую актуальность такой метод on-line мониторинга имеет в условиях действующих объектов энергетики, где реализация разработанной динамической коррекции показаний не представляется возможной по причине отсутствия цифровых ПТК в структуре АСУТП. В таких случаях моделирование показаний виртуального датчика открывает и возможности по организации независимого высокоточного контроля уровня, в том числе переходных режимах работы технологического оборудования.

Математическое моделирование виртуального датчика по аналогии с разработанными методами коррекции основывается на расчетах значений уровня с учетом поправочных коэффициентов  $K$  и  $B$  с тем отличием, что в качестве исходных данных используются не показания канала  $L_{\text{хш}}$ , а сами измеряемые значения перепадов давлений на датчиках:

$$L_M = K \cdot \Delta P + B \quad (6)$$

где:

$$K = \rho'' - \rho' \cdot g^{-1};$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\text{ил}1i} \cdot H_i + \sum_{j=1}^m \rho_{\text{ил}1j} \cdot h_j - \sum_{\gamma=1}^k \rho_{\text{ил}2\gamma} \cdot h_\gamma - \rho'' \cdot H}{\rho' - \rho''} + h_0.$$

где  $L_M$  – моделируемые показания датчика уровня;

$\Delta P$  – усредненное значение измеренного перепада давлений на дублирующих датчиках уровня;

$H$  – значение базы ИК уровня, найденное по результатам специализированных геодезических измерений.

Значение  $\Delta P$ , входящее в формулу (6), определяется следующим образом:

$$\Delta P = \rho_{\text{ик}} g H_{\text{ик}} - \rho'_{\text{ик}} g \cdot k^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k L_i - h_0 +$$

$$+ \rho''_{\text{ик}} \cdot g \cdot H_{\text{ик}} - k^{-1} \cdot \sum_{i=1}^k L_i - h_0 + \Delta P_0,$$

где  $\rho_{\text{ик}}$  – плотность воды в плюсовой импульсной линии, которая учтена при настройке дублирующих ИК уровня;

$H_{\text{ик}}$  – учтенное значение базы;

$\rho'_{\text{ик}}$  – учтенная плотность воды внутри технологической емкости;

$\rho''_{\text{к}}$  – учтенное значение плотности пара внутри технологической емкости;

$L_i$  – показания  $i$ -го измерительного канала;

$k$  – общее количество дублирующих ИК уровня.

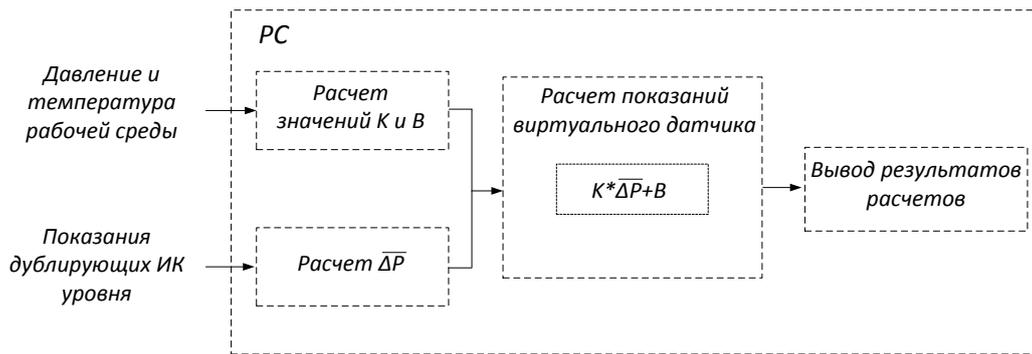


Рисунок 4. Организация математического моделирования виртуального датчика уровня

С целью осуществления метрологической диагностики в режиме реального времени или в определенные временные срезы показания каждого из дублирующих ИК уровня сверяются с моделируемыми показаниями виртуального датчика, и рассчитывается среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N L_n - M[L_M]^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N L_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{Mn}^2}$$

где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение за период времени  $N$ ;

$N$  – объем выборки по времени;

$L_n$  – текущее значение показаний штатного ИК уровня в момент времени  $n$ ;

$M[L_M]$  – математическое ожидание моделируемых показаний  $L_M$  за весь объем выборки;

$L_{Mn}$  – текущее значение показаний моделируемого датчика в момент времени  $n$ .

По превышению среднеквадратичного отклонения заданной границы констатируется факт неисправности ИК.

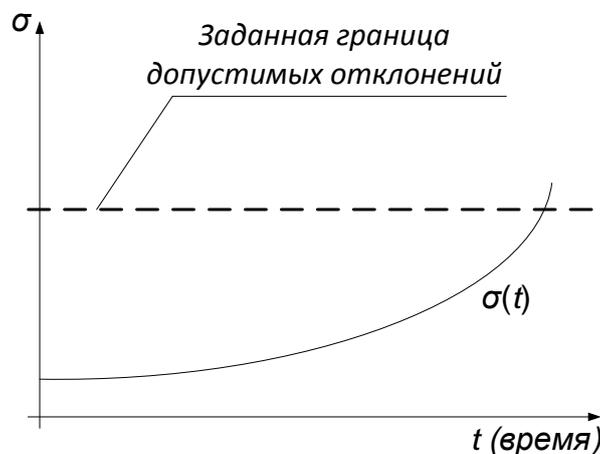


Рисунок 5. Выход среднеквадратичного отклонения за допустимую границу

Анализируя график зависимости среднеквадратичного отклонения от времени, становится возможным не только выявить погрешность измерений, но и идентифицировать причину её возникновения [5].

Предлагаемый метод on-line мониторинга позволяет решить основную задачу технического обслуживания – своевременно диагностировать тот или иной дефект, пока он не привел к критическому отказу/ошибке работы технологического оборудования и систем автоматизации. Применение данного метода открывает возможности создания отечественного экспертно-технического комплекса для метрологической диагностики информационно-измерительных систем объектов энергетики.

### **Заключение**

Разработанный алгоритм коррекции показаний гидростатических уровнемеров, учитывающий изменения множества параметров рабочей среды и технических характеристик измерительного канала, был внедрен в атомной энергетике. Это позволило снизить максимальную приведенную погрешность гидростатических уровнемеров при переходных режимах до 3 %.

Разработанная математическая модель виртуального датчика уровня для задач on-line мониторинга позволяет диагностировать не только явные, но и скрытые неисправности ИК. Практическая значимость данного метода on-line мониторинга заключается и в том, что он обеспечивает дистанционное выполнение метрологической диагностики ИК в условиях непрерывного технологического процесса. Позволяет своевременно идентифицировать возможную причину неисправности и, следовательно, ориентировать персонал по составу и объему ремонтных работ, сокращая, тем самым, время устранения неисправности, что имеет особую актуальность в зоне ограниченного доступа. При этом применение данного метода не требует вмешательства в работу штатного оборудования АСУТП.

В целом предлагаемые методы коррекции показаний и on-line мониторинга закладывают основы методологии повышения метрологической достоверности промышленных гидростатических уровнемеров с точки зрения многопараметрических измерений.

### **Литература**

1. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. – Lucerne: IAPWS, 2007. – 49 p.

2. Александров А.А. Система уравнений IAPWS-IF-97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч.1. Основные уравнения // Теплоэнергетика. – 1998. – № 9. – С. 69 – 77
3. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Е.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 316 с.
4. Калашников А.А. Справочник по настройке промышленных гидростатических уровнемеров. – М.: Инфра-Инженерия, 2017. – 194 с.
5. Калашников А.А. On-line мониторинг измерительных каналов уровня с датчиками разности давлений на АЭС. Ч.1. Математическая модель контрольного датчика // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 4. – С. 40 – 46

# ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВРЕМЯПРОЛЕТНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Гуревич В.М.

ЗАО “Центрприбор”, Москва

[raisa\\_gur@mail.ru](mailto:raisa_gur@mail.ru)

## 1 Введение

Характеристики времяпролетных ультразвуковых расходомеров (УЗР) определяются величинами, входящими в функцию преобразования расхода  $Q$ :

$$Q = 2826 \cdot D^2 \cdot V_o = 2826 \cdot D^2 \cdot K_g \cdot \frac{\Delta t}{t_{up} \cdot t_{dn}} \cdot \frac{L^2}{2L'}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $V_o$  – осредненная скорость потока, м/с;  $D$  – гидравлический диаметр, м;  $K_g = V_o/V_{УЗР}$  – гидродинамический коэффициент, как отношение осредненной скорости к скорости по траектории зондирования;  $L, L'$  – длина акустической базы и ее проекция на ось, соответственно, м;  $\Delta t = t_{dn} - t_{up}$  – разностный интервал времени распространения ультразвуковых (УЗ) колебаний вверх и вниз по потоку, с.

Факторами, ограничивающими точность измерения, являются изменчивость текущего значения  $K_g$  в диапазоне расходов и особенности гидравлического монтажа. Фактором, ограничивающим скорость реакции УЗР на изменение расхода, является случайный характер  $\Delta t$ .

Пульсации выходного сигнала, зависящие от размаха вариаций  $\Delta t$ , сглаживают с помощью фильтров, характеризуют допускаемым коэффициентом пульсаций  $[K]$  или нормируют допускаемым значением в долях  $Q_{max}$ . При использовании УЗР в быстродействующих системах автоматического регулирования с малой зоной нечувствительности, для приложений с малой задержкой отклика и малым временем нарастания  $t_n$  большие пульсации  $\Delta t$  приводят к дестабилизации работы.

Для решения технического противоречия и определения параметров фильтров требуется знание природы и поведения флюктуаций  $\Delta t$  (мгновенной скорости или расхода).

## 2 Статистические характеристики разности времени распространения $\Delta t$

Физические причины случайного характера  $\Delta t$  – турбулентные вихри, неоднородности акустического импеданса и закрутка потока. Наибольшее влияние оказывают турбулентные вихри масштаба, соизмеримого с диаметром ультразвукового (УЗ) луча [1].

В турбулентном потоке траектория становится зигзагообразной из-за искажения волнового фронта УЗ посылки, неоднородностей среды, изменяющих соотношения прохождения, отражения и преломления ультразвука, суммирования векторов скорости  $c$  звука с окружной скоростью крупномасштабных вихрей или закрутки потока, пересекающих луч. Акустическая база удлиняется, времена распространения увеличиваются, профиль скоростей перестает быть гладким (рис. 1).

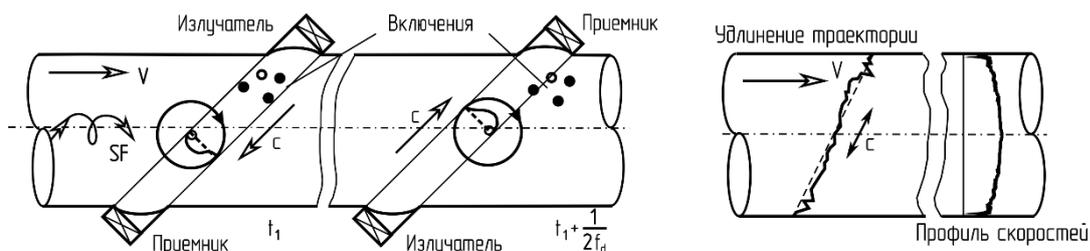


Рис. 1. Физические причины флюктуаций  $\Delta t$

Исследования проводились на водной объемной поверочной установке динамического типа с погрешностью  $\pm 0,2\%$  в диапазоне изменения  $\lg(Re) = 2,2 - 5,7$  и при температурах среды в диапазоне от 15 до 55°C. Тип первичного преобразователя – прямоточный, “наклонный диаметр”, DN 20 – 65, с отражениями (DN 20) или без них.

Особенностью установки являлись наборы из локальных сопротивлений и прямых участков разной длины, возможность создания импульса расхода с помощью клапана, считывание значений  $\Delta t$  в рабочее пространство MatLab под управлением m-файла.

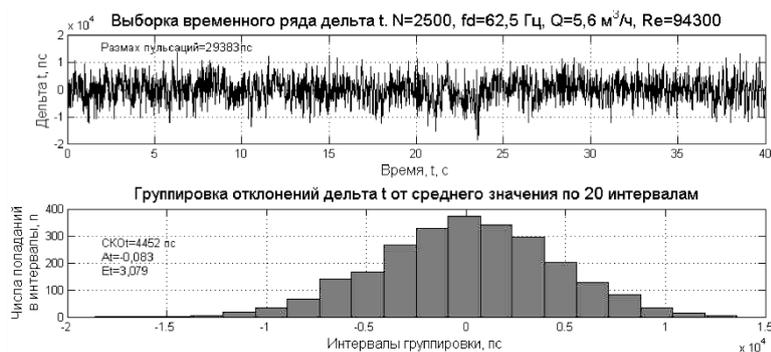


Рис. 2. Шумовая дорожка  $\Delta t$ , DN 20,  $Q_{max}$ , прямой участок  $L_{ent} > 30DN$

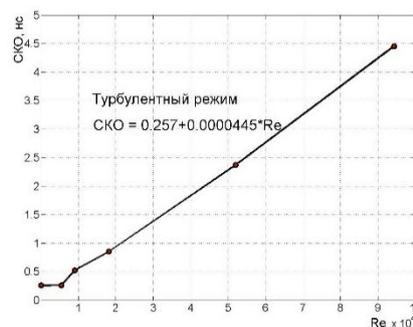


Рис. 3. Зависимость  $\sigma_{\Delta t}(Re)$

Шумовые дорожки  $\Delta t$  считывались в 7-10 точках диапазона расходов для разных условных проходов, местных сопротивлений на входе и режимах течения (рис. 2). Дальнейшая обработка предусматривала определение среднеквадратического отклонения  $\sigma_{\Delta t}$ , статистических моментов, построение спектра, автокорреляционной функции (АКФ) и установление характера распределения вероятностей.

Проверка отклонения распределения вероятностей  $\Delta t$  от нормального проводилась при объемах выборки  $N = 2500$  и уровнях значимости  $\alpha = 0,05$  с помощью теста Харке-Бера (Jarque-Bera test, сверка асимметрии  $A_t$  и эксцесса  $E_t$  с моментами нормального распределения  $A_t = 0, E_t = 3$ ) с числом степеней свободы  $f = 2$ , а также с помощью критерия согласия Пирсона (критерий  $\chi^2$ ) с числом степеней свободы  $f = 18$ .

Гипотеза  $H_0$  о нормальном распределении всех выборок  $\Delta t$  в исследуемых точках расхода, включая неподвижную среду, не отвергалась.

Значения  $\sigma_{\Delta t}$  (СКО) в турбулентной области (рис.3) имеют практически линейную зависимость от расхода (или  $Re, \Delta t$ ). Например, для DN 20,  $L_{ent} = 45D$  установленная опытным путем зависимость  $\sigma_{\Delta t}(Re)$  имела вид:

$$\sigma_{\Delta t} = 0,257 + 0.0000445 * Re.$$

Эта зависимость является характеристикой конкретного первичного преобразователя, поскольку  $\sigma_{\Delta t}$  зависит от длины акустической базы,  $L$ , вида локального сопротивления на входе и длины входного прямого участка  $L_{ent}$ . Так, если при невозмущенном входе  $L_{ent} = 45D$  уровень турбулентности, определяемый как  $\sigma_{\Delta t}/\Delta t$ , составляет 2,5 %, то при установке на входе одного колена  $90^\circ$  при  $L_{ent} = 2D$  он возрастает до 3,8%.

Спектр содержал гармонические составляющие со случайной фазой и амплитудой, кратные приблизительно 0,25 Гц, амплитуда которых после 5 Гц была близка к нулю.

По результатам анализа проводилось моделирование сигналов  $\Delta t$  в среде Simulink для опробования аварийных ситуаций, не реализуемых на поверочной установке (рис. 4). Моделировались начальная шумовая составляющая при неподвижной среде (“Random Number”), построитель импульса, перепада, тренда среднего уровня  $\Delta t$  (“Signal Builder”), полигармонический сигнал из первой, третьей и пятой гармоник со случайной фазой (блоки “Sine Wave”) и шумовая составляющая (“Random Number1”), изменяющиеся пропорционально среднему уровню  $\Delta t$  с помощью блоков сложения и умножения. Частота дискретизации  $f_d = 62.5$  Гц.

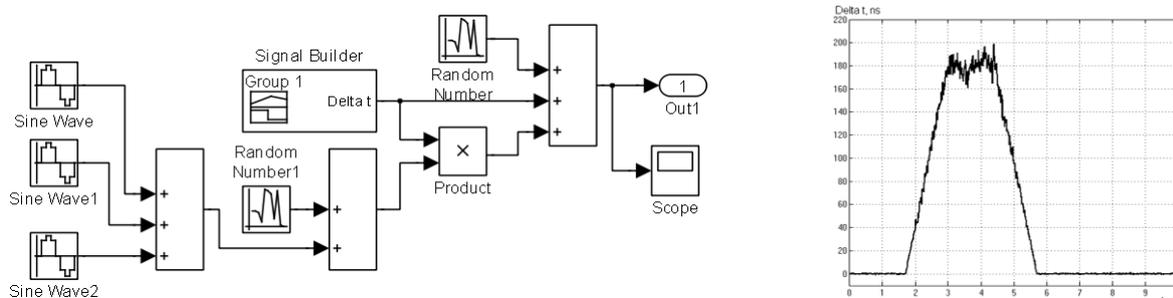


Рис. 4. Моделирование импульса  $\Delta t = 180$  пс (DN 20,  $Q = 0,5Q_{max} = 3,0$  м<sup>3</sup>/ч)

Уменьшение времени нарастания  $t_n$  при сохранении уровня фильтрации возможно за счет увеличения частоты озвучивания  $f_d$ , однако, существует два ограничительных момента: возрастание маскирующего действия многократных эхо-сигналов и коррелированность членов дискретно-временного ряда  $\Delta t$ . Последнее ограничение связано с тем, что только усреднение по статистически независимым отсчетам приводит к уменьшению выходных флюктуаций.

Пространственная корреляция отсчетов вызывается вихрями в турбулентном потоке, которые достаточно медленно распадаются в кадре, движущемся со скоростью  $V_0$ . Вихри перемещаются мимо УЗ луча (рис. 1), и их пространственная корреляция приводят к временной корреляции  $\Delta t$ . До тех пор, пока время выборки  $1/f_d$  больше времени корреляции  $\tau$  сглаживание корректно. Время корреляции увеличивается с уменьшением скорости  $V_0$  и увеличением диаметра трубы  $D$ , зависит от длины  $L$  и соотношения  $q$  диаметров УЗ луча и трубы, а также от конструкции, и учитывается обобщенным коэффициентом  $m$ , значение которого находится в пределах от 0,15 до 0,25. Для минимальной скорости  $V_{0m}$  в турбулентном режиме ( $Re=1e+4$ ) справедливо неравенство

$$f_d \leq \frac{V_{0m}}{mD}.$$

Построение АКФ проводилось по выборке, полученной для DN 20 ( $D = 0,02$  м,  $V_{0m} = 0,5$  м/с,  $m = 0,2$ ). Время корреляции  $\tau$  оценивалось по интервалу между главным максимумом АКФ и второму пересечению с осью времени, и составляло приблизительно 8 мс. То есть, например, для условного прохода DN 20 статистическая независимость флюктуаций  $\Delta t$  сохраняется до частот озвучивания  $f_d = 125$  Гц.

### 3 Коррекция времени нарастания

При измерениях объема в УЗР используется выходной фильтр, который реализует алгоритм простого скользящего среднего (SMA), характеризующийся постоянством ширины скользящего окна  $W$  и одинаковыми весовыми коэффициентами. Связь между входными и выходными величинами и их оценками:

$$\hat{y}_t = \frac{W-1}{W} \hat{y}_{t-1} + \frac{1}{W} \cdot x_t.$$

Сглаживание используется для улучшения визуального восприятия данных, однако в режиме измерения расхода требование высокого уровня сглаживания пульсаций часто сочетается с требованием малого времени нарастания  $t_n$ . При заданном коэффициенте пульсации  $[K]$  выходного сигнала требуется степень фильтрации, определяемая максимальной шириной окна  $W$

$$\left( \frac{6,6 \cdot \sigma_{\Delta t}}{\Delta t_{\max} \cdot [K]} \right)^2,$$

которая может достигать  $W > 1000$ . Однако когда зашумленная измеряемая величина изменяется резко, фильтр становится излишне инертным и недостаточно быстро реагирует на реальные изменения во входном сигнале, внося недопустимые искажения.

Большое время адаптации (150-200 итераций) и высокая сложность реализации исполняемого кода также требуют жертвовать оптимальным построением фильтров в пользу более простого решения, имеющего наглядный физический смысл.

Выбор между фильтрацией шума, задержкой отклика и  $t_n$  фильтра делается на основе каскадной фильтрации с выходом в виде фильтра, использующего экспоненциальное скользящее среднее (ЕМА) и прямой зависимостью степени сглаживания от коэффициента  $\alpha$ :

$$\hat{y}_t = (1 - \alpha) \cdot x_t + \alpha \cdot \hat{y}_{t-1}.$$

Из-за наличия обратной связи экспоненциальный фильтр проводит учет всех предыдущих значений, а также обладает свойством быстрого приближения к значениям после скачка.

При отсутствии тренда, превышающего порог, нелинейный адаптивный алгоритм предусматривает установку весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $(-\alpha)$  с учетом зависимости  $\sigma_{\Delta t}(\Delta t)$ , а при обнаружении тренда весовые коэффициенты меняются местами.

Наличие тренда (скачка)  $\Delta t$  (скорости, расхода) устанавливаются с помощью оценки:

$$\theta_n = [\Delta t(n + M) - \Delta t(n - M)]^2,$$

которая близка к нулю при медленном изменении сигнала в окрестности текущего входного отсчёта и резко возрастает при превышении трендом порогового значения. Результаты моделирования обнаружителя тренда как подсистемы в среде Simulink при  $M = 8$ , объединенного с первым каскадом сглаживания на SMA, приведены на рис. 5.

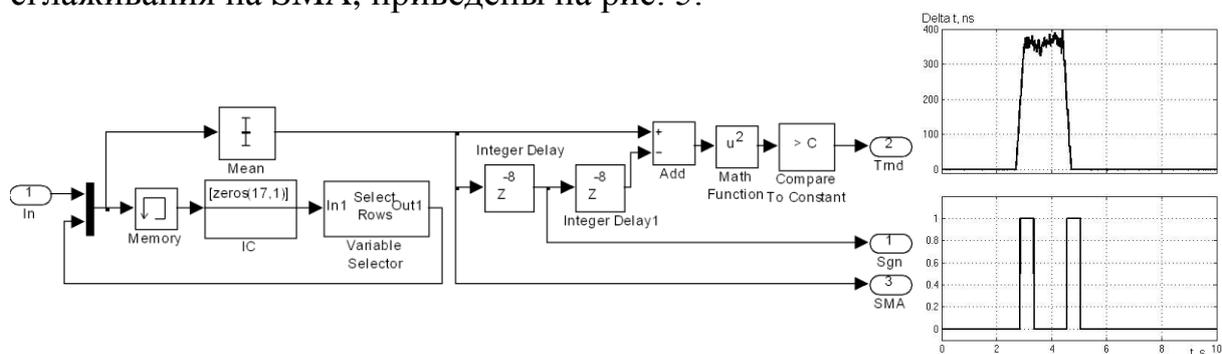


Рис. 5. Обнаружение тренда или скачка сигнала

Петля из последовательно соединенных мультиплексора “Mux”, задержки на период озвучивания “Memory”, установки начального значения сигнала “IC”, переменного селектора “Variable Selector” группирует из входного сигнала “In” окно SMA с шириной  $W$ , в пределах которого блок “Mean” находит среднее арифметическое. Сглаживание входного сигнала “In” (вверху) уменьшает размах вариаций в 2-4 раза и стабилизирует работу обнаружителя тренда, а его степень ограничивается лишь допускаемой задержкой отклика и  $t_n$ .

Предварительно сглаженный входной сигнал поступает на интегральные линии задержки “Integer Delay” и “Integer Delay1”, из текущего значения вычитается задержанное значение с помощью блока “Add”, а разность возводится в квадрат с помощью блока математических операций. Вычисленная оценка  $\theta_n$  сравнивается с порогом при помощи компаратора “Compare To Constant”, а выходной сигнал с логическими уровнями (внизу) управляет переключением весовых коэффициентов  $\alpha$  и  $(1-\alpha)$ .

На рис. 6 приведена модель нелинейного адаптивного фильтра с осциллограммами входного (вверху) и выходного (внизу) сигналов. Проверка проводилась, как при подаче входного сигнала от блока “Signal modeling” (рис. 4), так и при считывании шумовых дорожек  $\Delta t$  из рабочего пространства с помощью блока “From Workspace”.

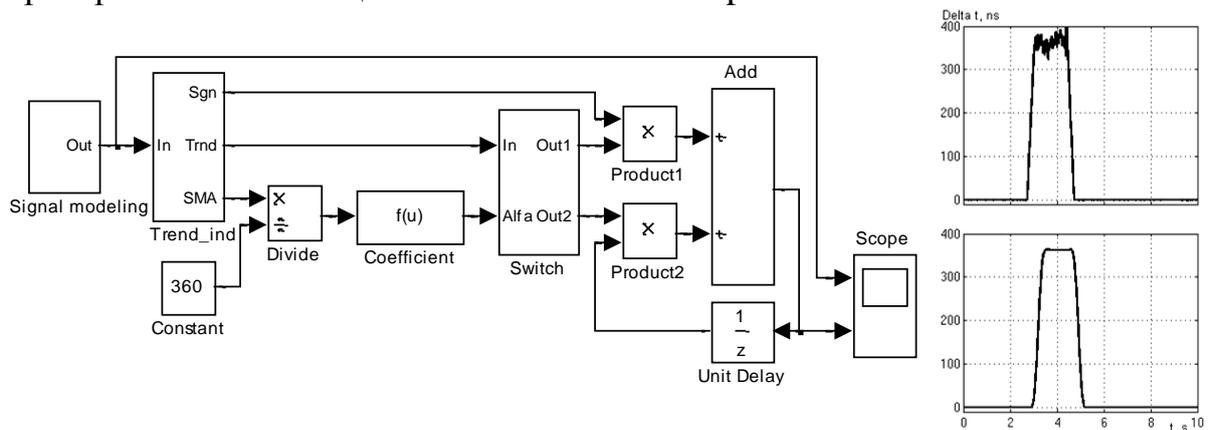


Рис. 6. Моделирование нелинейного адаптивного фильтра

Экспоненциальный фильтр реализован на блоке “Add”, выход которого через единичную задержку и блок умножения “Product2” поступает на вход сумматора, на другой вход которого через блок умножения “Product1” поступает входной сигнал. В установившемся режиме блок ключей “Switch”, управляемый логическими уровнями индикатора тренда, устанавливает на втором входе “Product2” коэффициент  $\alpha$ , а на входе “Product1” –  $(1-\alpha)$ . При обнаружении тренда коммутация коэффициентов обратная.

Коэффициент  $\alpha$  зависит от значения  $\sigma_{\Delta t}$  входного сигнала (рис. 3) в относительных единицах и определяется выражением вида:

$$\alpha = (1 + \operatorname{atan}((u * 30) - 15) / \pi) / 2 + 0,25,$$

где  $u = \Delta t / \Delta t_{max}$  – относительное значение входного сигнала ( $\Delta t$ , скорость, расход).

Получение нужной зависимости  $\alpha(u)$  достигается с помощью блока “Coefficient” для функций, определяемых пользователем. Диапазон  $\alpha$  для нашего случая находится в пределах от 0,55 до 0,98 при изменении входных значений от 0 до 1. Получение входного сигнала в относительных единицах реализовано на блоках “Constant” и “Divide”.

Алгоритм нелинейного адаптивного фильтра был реализован в исполняемом коде микроконтроллера УЗР и опробован на реальном потоке при создании импульса расхода с помощью трехходового электрически управляемого клапана.

Отклики для традиционного и адаптивного алгоритмов показаны на рис. 7 и 8.

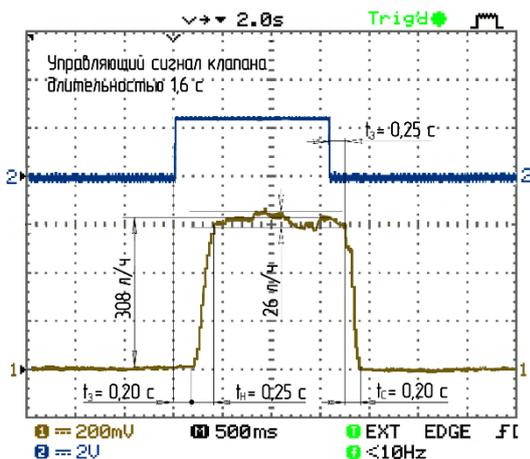


Рис.7. Фильтр простого скользящего среднего,  $t_n = 0,3$  с, отклик выходного напряжения при импульсе расхода 0 – 308 л/ч длительностью 1,6 с

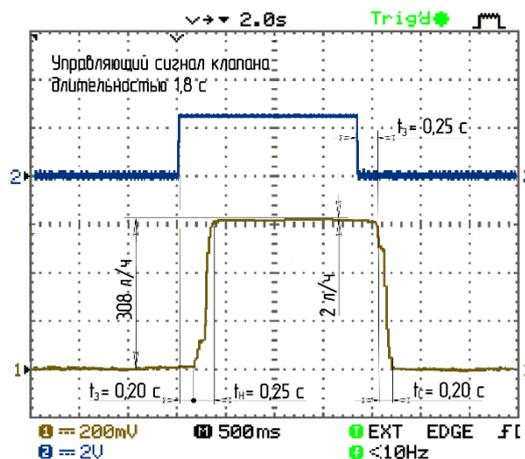


Рис.8. Нелинейный адаптивный фильтр, отклик выходного напряжения при импульсе расхода 0 – 308 л/ч длительностью 1,8 с

В случае нелинейного адаптивного фильтра сглаживание фронтов и срезов импульса или тренда минимально и практически определяется первым каскадом, в то время как в установившихся режимах оно возрастает до обеспечения допустимых выходных пульсаций.

#### 4 Коррекция статической характеристики

При выпуске из производства калибровка и поверка УЗР проводится в нормальных условиях, на установившемся потоке при отделении любого локального сопротивления от входа расходомера прямым участком

трубопровода  $L_{ent}$ . Длина прямого участка в калибрах,  $L_{ent}/D$ , без учета фактора “закрутки”, необходимая для полного устранения возмущения от любого локального сопротивления, для всех режимов потока определяется как

$$L_{ent}/D \geq 4.343 \cdot \ln(Re),$$

а ее зависимость от числа Рейнольдса,  $Re$ , проиллюстрирована на рис. 9. Однако даже при выполнении требований по входным участкам при нормальных условиях базовый гидродинамический (калибровочный) коэффициент  $K_{gb}$  изменяется в широких пределах. Например, для DN 50, на потоках с числами  $Re$  от 10 до 200000,  $K_{gb}$  изменяется от 0,7808 до 0,9450, что составляет приблизительно 17%.

Ход  $K_{gb}(Re)$  по 34 узловым точкам, приведен на рис. 10.

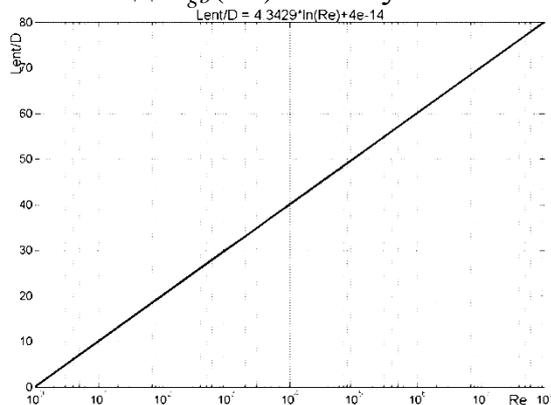


Рис.9 – Зависимость длины прямых участков в калибрах,  $L_{ent}/D$ , от числа  $Re$

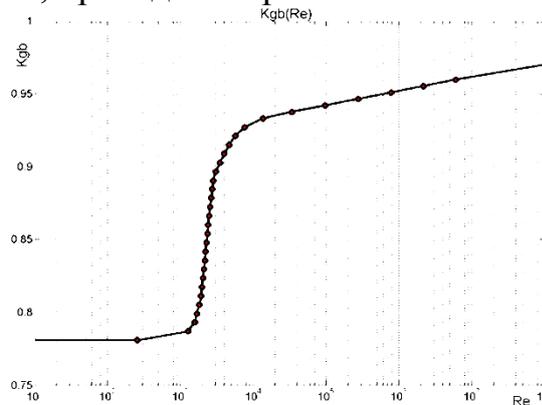


Рис.10 – Зависимость базового гидродинамического коэффициента,  $K_{gb}$ , от числа  $Re$

Существует ряд эмпирических зависимостей  $K_{gb}(Re)$ , которые требуют знания текущего значения кинематического коэффициента вязкости среды,  $\nu$ , и последующего вычисления  $Re$ . При измерении нефтепродуктов используют поточный плотномер с опцией измерения  $\nu$ . Для водных потоков измеряют температуру среды,  $T$ , и применяют эмпирическую формулу Пуазейля:

$$\nu = \frac{1,78 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,000221 \cdot T^2}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

При эксплуатации УЗР в ряде случаев выполнение требований входных участков невозможно, осесимметричные потоки заменяются деформированными и ситуация с вычислением градуировочных коэффициентов еще более усугубляется. Поэтому калибровочная кривая УЗР без гарантии того, что его работа в условиях эксплуатации будет соответствовать функционированию на поверочной установке, не имеет смысла, так как реальные условия эксплуатации, как правило, сложнее условий, существующих в поверочных лабораториях из-за зависимости

$K_g(Re)$  и эффектов установки, вызванных воздействием местных сопротивлений на входе.

Основные применяемые решения: использование кондиционеров потока, разработка траекторий зондирования, малочувствительных к профилю скоростей, применение многолучевых УЗР с использованием траекторий в узлах квадратуры Гаусса, калибровка для конкретной установки, линеаризация полиномом вида  $A_0 + A_1Q + A_2Q^2$ .

Несмотря на усложнение конструкции или процедуры калибровки, методы не являются универсальными, и в случае коммерческого использования УЗР на границах балансовой принадлежности хозяйствующих субъектов приводят к финансовым спорам.

От этого недостатка свободен метод по патенту США № 7643947, предусматривающий предварительное измерение  $v$ , вычисление  $Re$  и автоматический расчет текущих значений  $K_g$  по факту конкретной установки.

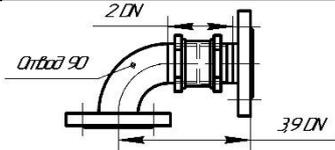
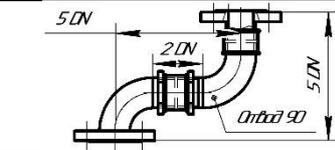
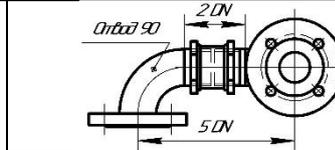
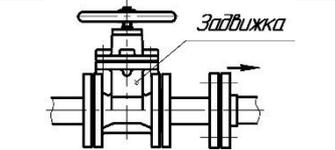
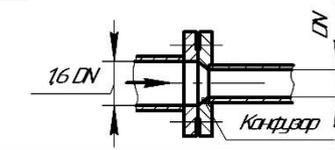
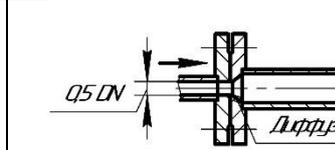
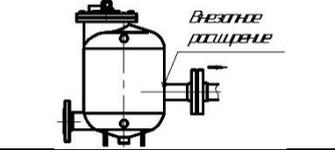
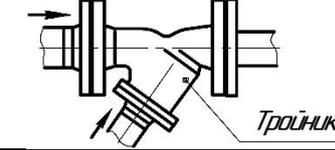
Для первичного преобразователя типа “наклонный диаметр” формула метода дополнена множителем  $q = d/D$ , представляющим отношение диаметров пьезоактивного материала к трубопроводу и учитывающим уменьшение  $K_g$  из-за расчета не вдоль траектории зондирования, а с учетом диаметра УЗ луча.

При фиксированном наборе местных сопротивлений создается эмпирическая библиотека файлов расчета  $K_g$ , идентифицируемых условным номером  $N$ , который определяет номер начальной кривой  $IC$  и фактор закрутки  $SF$  при известных числах  $Re$  и длинах прямых участков  $L_{ent}$ :

$$K_g = K_{gb} + q \cdot \frac{(1 - K_{gb}) * \text{Max} \left[ 0, IC - \frac{L_{ent}}{[SF * (4,343 * \ln(Re) + 4e - 14)]} * 10 \right]}{10}.$$

Начальные кривые в наборе из 10 местных сопротивлений (см. таблицу) имеют ход, аналогичный базовому коэффициенту  $K_{gb}$ , и смещены относительно него в сторону увеличения на  $IC \cdot [(1 - K_{gb})/10]$ , поскольку любая деформация потока приводит только к возрастанию текущего значения  $K_g$ .

Таблица – Набор выбранных местных сопротивлений на входе УЗР

		
$N=1$ . Одно колено $90^\circ$ ; $IC=8$ ; $SF=1,50$	$N=2$ . Два колена $90^\circ$ в одной плоскости; $IC=12$ ; $SF=2,50$	$N=3$ . Два колена $90^\circ$ в разных плоскостях; $IC=10$ ; $SF=1,25$
		
$N=4$ . Задвижка вверх по течению; $IC=5$ ; $SF=1,10$	$N=5$ . Расширение диаметра трубы; $IC=3$ ; $SF=1,00$	$N=6$ . Сужение диаметра трубы; $IC=8$ ; $SF=1,00$
		
$N=7$ . Нормальный вход; $IC=7$ ; $SF=3,00$	$N=8$ . Разделение потока на входе; $IC=7$ ; $SF=1,10$	$N=9$ . Интрузивный элемент; $IC=3$ ; $SF=1,05$

Примечание. – Для прямого входного участка свыше 45 DN:  $N=0$ ,  $IC=1$ ,  $SF=1$

Для облегчения процедуры эмпирического определения калибровочных коэффициентов на поверочной установке в процессе подбора значений  $IC$  и  $SF$  был реализован калькулятор  $K_g$  в виде m-файла в среде MatLab. На рис.11 в качестве примера приведены расчет хода базовой кривой  $K_{gb}$  и  $K_g$  при воздействии двух колен  $90^\circ$  в разных плоскостях ( $N=3$ ) и сужения сечения на входе ( $N=6$ ) при длине прямых участков  $L_{ent}=5$ .

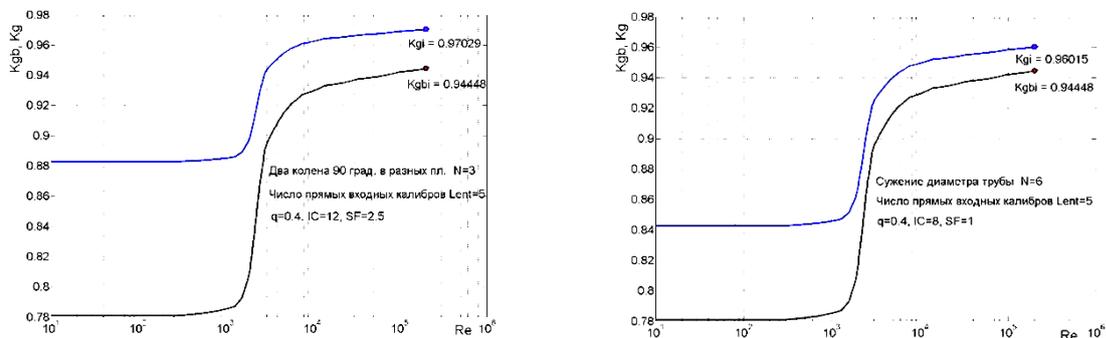


Рисунок 11. Зависимости  $K_g(Re)$  при разных местных сопротивлениях

Значения  $K_g$  сопоставлялись с ходом базового гидродинамического коэффициента  $K_{gb}$  и оценивались расхождения, например, в  $i$ -ой точке

$Re_i = 2e+5$ . Они составили 1,66 и 2,73 %, соответственно, что определяло увеличение относительной погрешности УЗР.

После реализации алгоритма в исполняемом коде микроконтроллера УЗР были проведены расширенные натурные испытания с DN 20 – 65 на водных потоках в интервале температур от 10 до 55 °С, с набором местных сопротивлений по таблице для диапазона  $L_{ent}$  от 3 до 25. После калибровки на прямом участке 50DN воспроизводилась исследуемая деформирующая структура, характерные признаки  $N$ ,  $L_{ent}$  и  $d$ , которой вводились с клавиатуры вычислителя или по линии RS-485.

Результаты калибровок в одном из видов испытаний приведены на рис. 12 и 13.

Два колена 90° в одной плоскости, DN 50

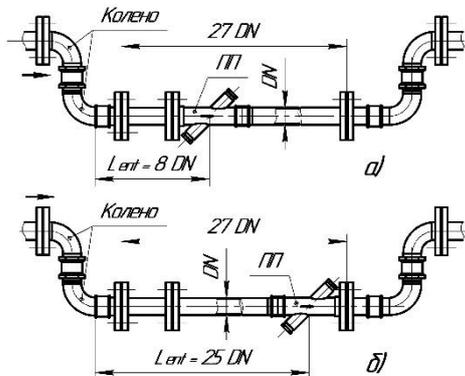


Рис. 12. Длины входных участков:  
а)  $L_{ent} = 8 \text{ DN}$ ; б)  $L_{ent} = 25 \text{ DN}$

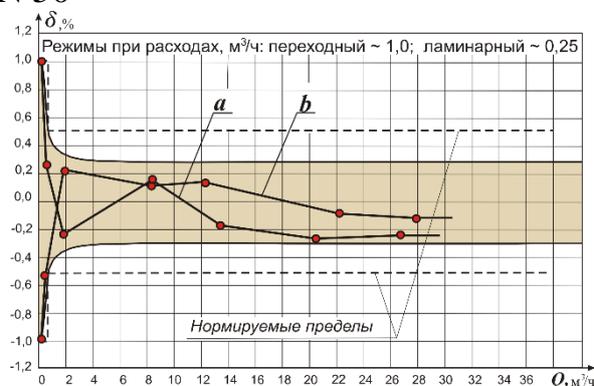


Рис. 13. Результаты калибровок:  
а)  $L_{ent} = 8 \text{ DN}$ ; б)  $L_{ent} = 25 \text{ DN}$

Комплекс испытаний с применением описанного алгоритма, проведенный в диапазоне изменения  $\lg(Re)$  от 2,2 до 5,7, показал существенное снижение погрешности и увеличение кратности диапазона измерений до 150, то есть поддержание работоспособности на всех режимах течений – ламинарном, переходном и турбулентном.

Набор характерных местных сопротивлений на входе можно увеличить свыше 10 или дополнить его группами из двух-трех за счет уплотнения расстановки начальных кривых  $IC$ , изменения и подбора соответствующих коэффициентов в алгоритме.

Несмотря на кропотливость эмпирического подбора коэффициентов для каждого местного сопротивления в диапазоне расходов, метод прост в использовании и сводится к вводу  $N$  и  $L_{ent}$  по факту установки УЗР, однако, допускает возможность преднамеренной или непреднамеренной ошибки ввода данных.

Для устранения субъективного фактора перспективным является использование корреляции между  $\sigma_{\Delta t}$  разности времени распространения  $\Delta t$  и текущим значением гидродинамического коэффициента  $K_g$  (рис. 3 и 10)

при нормировании шумовых характеристик на неподвижной среде и максимальном расходе как базовых значений. Такой подход не требует идентификации местных сопротивлений и прямых участков.

## 5 Метрологический самоконтроль

При эксплуатации УЗР в условиях, не допускающих демонтаж для поверки, проводится метрологический самоконтроль на неподвижной среде. Процедура предусматривает имитацию фиксированных точек расхода, дольных от максимального  $Q_{max}$ , за счет искусственного введения соответствующих разностных интервалов времени  $\Delta t$ . Самодиагностика позволяет оценить смещение аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности (на “нулевом” расходе и в имитируемых точках) относительно первичной поверки, причем контролю подвергаются все составные части УЗР, так как при имитации используются реально измеренные временные интервалы вниз и вверх по потоку.

К недостаткам относятся ограничение температурного диапазона измеряемой среды при самоконтроле из-за температурной, барической и других зависимостей скорости звука и недопустимость использования жидкостей-заменителей.

Для преодоления обозначенных ограничений предлагается следующая процедура.

При выпуске из производства, используя функцию преобразования, рассчитывают и вводят в память вычислителя разностные интервалы времени

$$\Delta t_1^{20}; \Delta t_2^{20}; \Delta t_3^{20}$$

и т.д., соответствующие нескольким точкам диапазона расхода в нормальных условиях. Запоминают скорость звука  $c_0^{20}$ , при которой проводились расчеты.

При самодиагностике вычислитель рассчитывает значение скорости звука  $c$ :

$$c = \left( \frac{1}{t_{up}} + \frac{1}{t_{dn}} \right) \cdot \frac{L}{2} \text{ м/с.}$$

Коррекция разностных временных интервалов при изменении параметров среды (состава, температуры, давления) на месте эксплуатации проводится микроконтроллером вычислителя для имитируемых точек расхода автоматически, по формуле:

$$\Delta t_i = \Delta t_i^{20} \cdot \frac{(c_0^{20})^2}{c^2}.$$

Используя реальные значения времени распространения УЗК в неподвижной среде  $t_{up}$  и  $t_{dn}$ , вычислитель определяет интервалы времени для каждой точки расхода

$$t_{up} - \Delta t_i/2; \quad t_{dn} + \Delta t_i/2.$$

При вызове оператором имитируемой точки расхода, вычисленные интервалы подставляются в функцию преобразования.

## **6 Заключение**

Для оптимизации характеристик УЗР используют поточное измерение (вычисление) таких физических величин как температура, скорость звука, кинематическая вязкость, а также статистические характеристики разностного времени распространения УЗ колебаний по потоку и против него.

## **Литература**

1. Weber F.J., Johari H. and Durgin W.W. ASME FEDSM. 2001. вып. FEDSM2001-18038. С.85-91.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ БИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ОСТРОЙ ТОКСИЧНОСТИ ВОДЫ

Любимцев В.А.<sup>1</sup>, Холодкевич С.В.<sup>1,2</sup>, Дружинин И.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской академии наук,*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет*

<sup>3</sup>*ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»*

[lyubimcev55@mail.ru](mailto:lyubimcev55@mail.ru)

Использование животных в качестве "живых датчиков" (биодатчиков) находит в последнее время всё большее применение. Это обусловлено их высокой и разносторонней чувствительностью к различным факторам внешней среды, обеспечивающей выживание и конкурентоспособность как индивидуальных особей, так и вида в целом. Для контроля качества воды могут использоваться различные виды животных, для которых вода является естественной средой обитания, например, рыбы и малоподвижные беспозвоночные гидробионты – моллюски или раки.

В случае ухудшения качества воды биодатчики изменяют параметры своей жизнедеятельности, которые регистрируются и анализируются специализированной измерительной аппаратурой. Для рыб такими параметрами являются параметры, характеризующие их (двигательную активность), для моллюсков или раков – параметры сердечной деятельности (кардиоактивность). Совокупность биодатчиков и соответствующей измерительной аппаратуры может быть названа биоэлектронной системой (БЭС) [1].

Основным преимуществом использования биодатчиков в БЭС является их чувствительность к широкому кругу токсических химических соединений, действующих на клеточном уровне, и однотипный характер реакции на начальной стадии токсического поражения – увеличение частоты сердечных сокращений или частоты дыхания.

Это позволяет обеспечивать диагностику острой токсичности воды, то есть обнаружение в реальном времени случаев быстрого нарастания токсичности воды до уровня, опасного даже при ее разовом использовании. С этой целью БЭС устанавливаются на водозаборных пунктах систем централизованного водоснабжения населенных пунктов [2-4].

Основной вопрос, возникающий при использовании БЭС, это принципы нормирования ее метрологических характеристик и метрологического обеспечения. Если для электронной части БЭС этот вопрос может быть решен традиционными средствами метрологии, то задача нормирования метрологических характеристик биодатчиков, как

правило, не ставилась. Соответственно биодатчики формально не могли быть включены в измерительную систему как ее составные части. В данном случае они являются преобразователем некоторой измеряемой величины, эмпирически связанной с оценкой качества воды.

Тем не менее, очевидно, что для успешного функционирования БЭС в равной степени необходимы как исправно работающая электронная часть, так и «работоспособная» совокупность биодатчиков, отобранных с этой целью по определенным критериям.

В качестве примера решения вопроса о метрологическом обеспечении БЭС может быть рассмотрена многоканальная система «БиоАргус», разработанная в научно-исследовательском центре экологической безопасности РАН (Санкт-Петербург). Система состоит из 6-8 однотипных измерительных каналов (ИК), в которых в качестве биодатчиков используются речные раки, размещенные в индивидуальных аквариумах, а в качестве измеряемой величины – частота сердечных сокращений (ЧСС) раков.

Принцип действия ИК системы основан на лазерном облучении наружной поверхности речного рака в зоне локализации его сердца с последующей регистрацией потока излучения, рассеянного в обратном направлении.

Структурная схема ИК и схема формирования оптического сигнала, модулируемого сокращением сердца рака, приведены на рис. 1. ИК системы содержит лазерный волоконно-оптический преобразователь пульсаций (ЛВОПП) 1, гибкий волоконно-оптический зонд, состоящий из излучающего 2 и приемного 5 волокон, держатель волоконно-оптического зонда 7 и блок обработки сигнала 6. Держатель 7 фиксируется на панцире 3 рака. Гибкость и легкость волоконно-оптического зонда обеспечивают свободу перемещений рака.

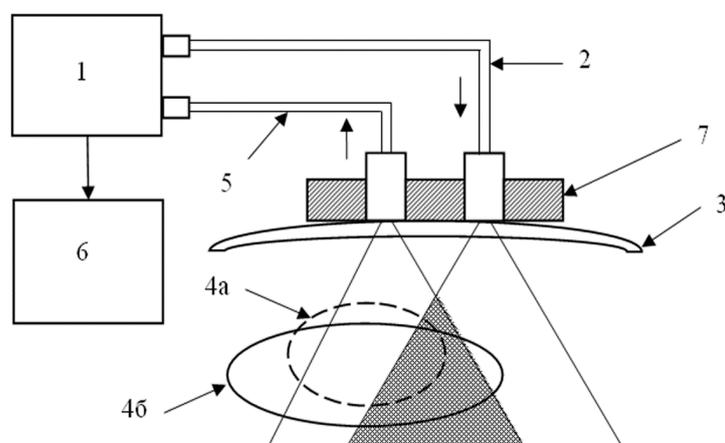


Рисунок 1. Структурная схема ИК БЭС «БиоАргус»

В качестве источника оптического излучения используется полупроводниковый лазер, расположенный в ЛВОПП. От выходного оптического разъема ЛВОПП излучение передается к поверхности рака по излучающему волокну 2. При сокращениях сердца рака (4а и 4б – сердце рака в период систолы и диастолы) происходит изменение оптических свойств сердечной сумки и тканей, находящихся между сердцем и наружной поверхностью рака. Вследствие этого происходит циклическое изменение рассеянного потока излучения. Часть этого рассеянного потока попадает в приемное волокно 5, по которому поступает на входной оптический разъем ЛВОПП.

В ЛВОПП с помощью фотоприемника оптический сигнал преобразуется в напряжение, из которого выделяется переменная составляющая, несущая информацию о циклических сокращениях сердца рака. В блоке 6 напряжение преобразуется в цифровой код, который обрабатывается по заданной программе с целью определения ЧСС, статистических характеристик и других параметров, связанных с ЧСС, выработки сигналов о токсическом загрязнении воды, сигналов о технической и метрологической исправности системы.

Значение ЧСС вычисляется по выборке из 100 последовательных кардиоинтервалов как их среднее значение. Для этой же выборки вычисляется среднее квадратичное отклонение (SD) результатов измерений относительно этого среднего значения. Значения ЧСС и SD обновляются с заданной периодичностью.

Основной принцип, заложенный в алгоритм работы системы – выявление значимых, превышающих предел, свидетельствующий о возможном загрязнении воды, отклонений ЧСС раков от значений, принятых в качестве нормальных. При этом соответствующий сигнал формируется только в том случае, если эти отклонения были зафиксированы в течение заданного интервала времени у большинства используемых раков, что уменьшает вероятность выдачи ложного сигнала опасности.

Этот принцип иллюстрирует рис. 2, на котором показана в качестве примера характерная динамика изменения ЧСС для рака при температуре воды 18 °С в условиях покоя (участок от 15:40 до 16:44). Стрелкой 1 отмечен момент времени дозирования в воду модельного загрязнителя (20 г/л NaCl). Указаны уровни средних значений ЧСС(покой), величина SD – для «покоя» и значение ЧСС(стресс) – сразу после воздействия загрязнителя. Для уверенного различия состояний покоя и стресса разность ЧСС(стресс) и ЧСС(покой) должна существенно превышать суммарные случайные отклонения этих величин от их средних значений.

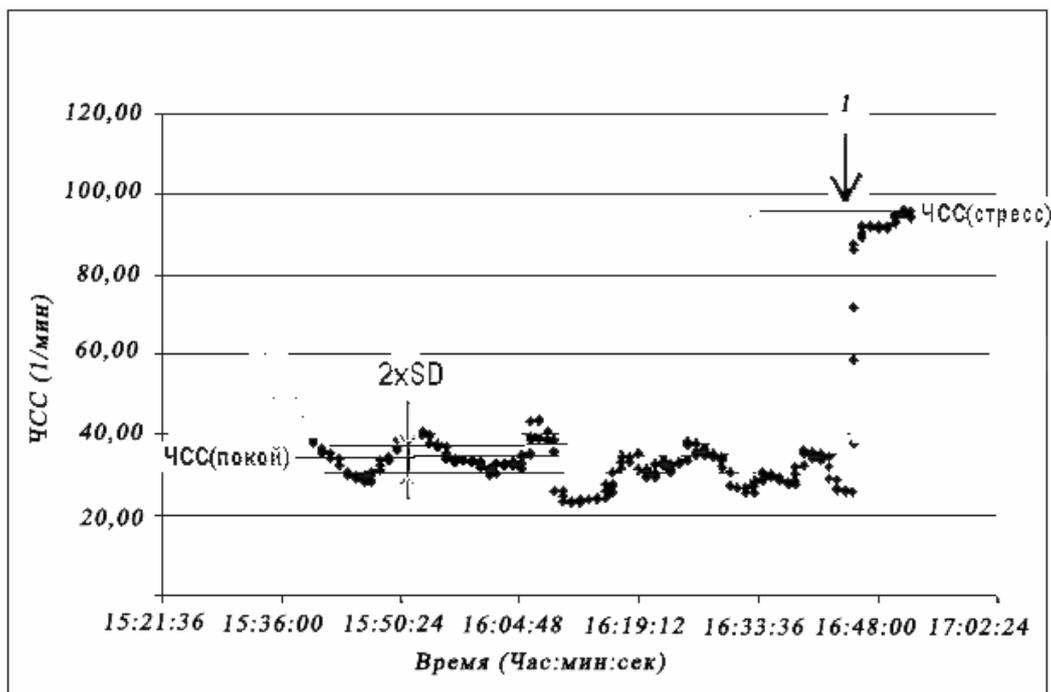


Рисунок 2. Характерная динамика изменения ЧСС рака при стрессе

Следует отметить, что использование этого алгоритма будет давать требуемые результаты только в том случае, если при его реализации будут учтены как общие особенности физиологии раков, так и индивидуальные характеристики кардиоактивности каждого животного.

В первую очередь, из результатов, используемых для контроля качества воды, должны быть исключены результаты измерений ЧСС, полученных в период «ночной» активности раков, связанной с поиском пищи, так как в этот период ЧСС раков существенно увеличивается (по сравнению с состоянием покоя в "дневное" время) при отсутствии каких-либо загрязнений воды. В системе "БиоАргус" чередование периодов "день" – "ночь" обеспечивается искусственным путем за счет включения и выключения ламп, обеспечивающих освещение изолированных от внешнего света аквариумов с раками.

Перед использованием раков в качестве биодатчиков они проходят отбор по двум основным критериям:

а) по параметрам, обеспечивающим примерную физиологическую однородность используемой совокупности раков – возрасту, длине, массе, равномерности окраски панциря, наличию активности;

б) по достаточности уровня сигнала, возникающего при циклических сокращениях сердца и зависящего от особенностей взаимного расположения и оптических свойств сердечной сумки и поверхностных тканей рака.

Практика показывает, что в среднем около 30 % исходной

совокупности раков удовлетворяет приведенным критериям.

После отбора выбранные раки помещаются не менее чем на сутки в отдельные аквариумы для получения данных об индивидуальных особенностях их кардиоактивности. Обработка данных проводится как автоматически, так и посредством анализа операторами, обеспечивающими настройку системы перед вводом ее в эксплуатацию. По окончании обработки для каждого ИК (каждого биодатчика) устанавливаются индивидуальные значения ЧСС(покой) и SD(покой) и допускаемые отклонения от этих значений, соответствующие нормальному качеству воды и метрологической исправности канала.

Следует отметить, что в дальнейшем эти значения автоматически корректируются в процессе эксплуатации системы, так как статистические данные о параметрах кардиоактивности непрерывно обновляются.

Дополнительно осуществляется автоматическая проверка наличия правильной периодичности суточной активности раков (наличие так называемого циркадного ритма: выраженного периода изменения ЧСС, обусловленного периодичностью освещенности «день» – «ночь») с целью подтверждения работоспособности биодатчика [5–7]: подтверждения того, что рак здоров и может продолжать использоваться для контроля качества воды [8]. Эта проверка может рассматриваться как метрологический самоконтроль применительно к биодатчикам.

Помимо перечисленных выше процедур, достоверность результатов измерений ЧСС обеспечивается применением дополнительных средств, обеспечивающих проверку параметров системы «БиоАргус» на этапе подготовки ее к использованию и в процессе эксплуатации.

Конструкцией ЛВОПП предусмотрена возможность, за счет нажатия кнопки подачи тестового сигнала, изменять силу тока, протекающего через лазерный излучатель. В момент нажатия кнопки в регистрируемом на выходе ЛВОПП-4 сигнале наблюдается импульс с крутым передним фронтом. Изменение тока подобрано таким образом, что амплитуда этого импульса приблизительно соответствует амплитуде сигнала, возникающего от сокращений сердца «среднестатистического» рака при измерении ЧСС «среднестатистическим» образцом ЛВОПП. С другой стороны, эта амплитуда пропорциональна среднему значению потока излучения лазера, произведению коэффициентов пропускания обоих волокон волоконно-оптического зонда и рассеивающей способности материала, находящегося в зоне установки волоконно-оптического зонда. В роли такого материала могут выступать как поверхностные ткани рака, так и пластины имитаторов этих тканей. Зависимость амплитуды импульса, возникающего при нажатии кнопки подачи тестового сигнала, от перечисленных выше параметров позволяет получить интегральную оценку состояния лазерного излучателя, волоконно-оптического зонда, электронной части ЛВОПП и

соответствующего измерительного канала в целом.

Исследования, проведенные с использованием более 100 раков, показали, что рассеянное отражение от поверхностных тканей рака хорошо воспроизводится при использовании в качестве имитатора этих тканей пластины из фторопласта-4 толщиной 4 мм. Таким образом, при установке держателя оптического зонда на пластину-имитатор вместо панциря рака, сигнал, поступающий в приемное волокно, соответствует сигналу, характерному для среднестатистического речного рака при отсутствии сокращений его сердца. Переменная составляющая сигнала в этом случае определяется оптическими и электронными шумами всех элементов, входящих в ИК, что позволяет количественно оценивать уровень этих шумов и контролировать этот уровень впоследствии в процессе эксплуатации. Использование кнопки подачи тестового сигнала позволяет сопоставлять уровень указанных шумов с ожидаемым уровнем полезного сигнала. В настоящее время эта процедура осуществляется в ручном режиме, но в перспективе предполагается ее автоматизировать, что позволит обеспечить периодический метрологический самоконтроль состояния оптоэлектронной части БЭС.

Использование пластины-имитатора позволяет получать интегральную оценку состояния соответствующего ИК, но не позволяет осуществлять для этого канала оценку погрешности измерений ЧСС. Для решения этой задачи используется устройство имитации пульсаций (рис. 3) – имитатор оптического сигнала, возникающего при сокращениях сердца рака.

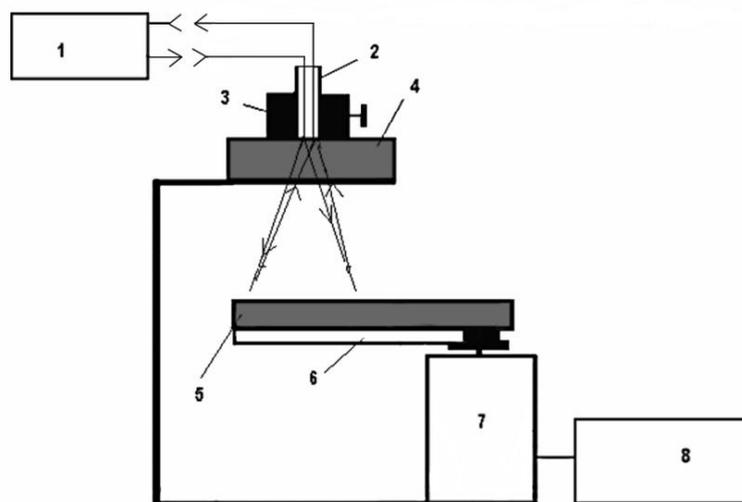


Рисунок 3. Устройство имитации пульсаций

В устройство входят элементы проверяемого ИК (ЛВОПП 1, оптический зонд 2, держатель оптического зонда 3) и элементы имитации сигнала (пластина-имитатор 4, пластина-модулятор 5, опорный диск 6, двигатель 7, блок управления двигателем 8).

Пластина 4 имитирует оптический сигнал, возникающий при отсутствии у рака сердечных сокращений. Для создания переменной составляющей потока излучения, аналогичной оптическому сигналу, возникающему при сокращении сердца рака, используется фторопластовая пластина 5 в виде сектора. Она закрепляется на опорном диске 6, прозрачном для лазерного излучения и насаженном на валу двигателя 7, который совместно с блоком управления 8 обеспечивает частоту вращения диска 6 с требуемой точностью. Конструкция устройства имитации пульсаций позволяет обеспечивать заданное расстояние между пластинами 4 и 5.

При вращении диска 6 в поток излучения, прошедший через пластину 4, попадают попеременно участок диска 6, пропускающий поток излучения, и пластина 5, рассеивающая его в обратном направлении. Рассеянный в обратном направлении поток проходит через пластину 3 и попадает в приемное волокно оптического зонда, формируя модулированный оптический сигнал.

Анализ источников погрешности ИК системы «БиоАргус» показал, что доминирующей составляющей этой погрешности является погрешность, обусловленная влиянием шумов оптико-электронного измерительного тракта.

В системе "БиоАргус" применены многомодовые оптические волокна, вследствие чего основным источником шума в ИК является оптический шум, обусловленный спонтанной подвижностью модовой структуры выходного светового потока из излучающего оптического волокна и неидеальностью усреднения этой неоднородности вследствие микроскопических неоднородностей поверхностного слоя панциря рака. Измерения показывают, что при отсутствии помехи, амплитуда оптического шума превышает амплитуду электронных шумов ИК в 6 - 10 раз.

С использованием устройства имитации пульсаций были получены следующие оценки относительной погрешности ИК системы "БиоАргус" при измерении ЧСС:

в диапазоне от 12 до 120 ударов/мин не более  $\pm 8$  % при отношении "сигнал/шум" не менее 5;

в диапазоне от 30 до 120 ударов/мин не более  $\pm 5$  % при отношении "сигнал/шум" не менее 2,6.

Диапазон от 30 до 120 ударов/мин является наиболее актуальным при использовании речных раков в качестве биодатчиков (см. рис. 2). Отношение ЧСС(стресс) к ЧСС(покой), как правило, не менее 2, поэтому приведенные значения погрешности позволяют надежно различить состояния покоя и стресса. Рисунок 2 наглядно иллюстрирует также особенность кардиоактивности раков, заключающуюся в том, что значение

SD понижается при повышении ЧСС. На этой особенности основана процедура метрологического самоконтроля ИК системы, использующая принцип информационной избыточности [9, 10]. Действительно, зафиксировав значение SD, характерное для состояния покоя рака и исправного ИК, следует далее ожидать относительной стабильности этого значения, либо же его уменьшения при увеличении ЧСС. Если в том же диапазоне ЧСС происходит заметное увеличение SD, то это может быть вызвано уменьшением отношения "сигнал/шум", приводящим к увеличению, в первую очередь, случайной погрешности измерений. При этом не важно, происходит ли это из-за уменьшения полезного сигнала (например, из-за уменьшения излучательной способности лазера, плохих контактов или загрязнения в оптической системе, изменения положения сердца рака или оптических свойств панциря) или из-за увеличения уровня шумов (например, из-за неисправности оптической или электронной части ИК, помех).

### **Заключение.**

Вопросы, связанные с метрологическим обеспечением БЭС "БиоАргус", рассмотренные выше, характерны и для других биоэлектронных систем. Для БЭС "БиоАргус" необходимо не только иметь техническую возможность проводить оценки эффективности биодатчиков и контроль их работоспособности в процессе эксплуатации, но также имитировать характерный для этих биодатчиков оптический сигнал при определении метрологических характеристик оптоэлектронной части БЭС. Возможен вариант нормирования метрологических характеристик биодатчиков с включением их в состав системы (например, посредством установления функциональной связи между количеством модельного загрязнителя и параметрами кардиоактивности), но в этом варианте не учитывается основное преимущество биодатчиков – реакция на интегральное качество воды. Перспективным представляется использование сочетания обоих способов нормирования метрологических характеристик БЭС – с нормированием реакции биодатчиков на воздействие модельного загрязнителя (или их совокупности) и с нормированием характеристик остальной части БЭС при их взаимодействии с имитаторами биодатчиков.

### **Литература**

- 1 Холодкевич С.В., Иванов А.В., Корниенко Е.Л., Куракин А.С., Любимцев В.А. Биоэлектронный мониторинг поверхностных вод // Мир измерений. 2011. № 10. С. 6–13.

- 2 Махнев П.П., Бекренев А.В., Бакланов В.С., Холодкевич С.В., Иванов А.В., Донченко В.К., Куракин А.С., Корниенко Е.Л., Федотов В.П. Система обеспечения безопасности водоснабжения на водопроводных станциях Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 9. ч. 1. С. 6–15.
- 3 Кармазинов Ф.В., Кинебас А.К., Бекренев А.В., Сулейманова Э.К., Холодкевич С.В., Иванов А.В. Опыт эксплуатации систем биомониторинга качества воды в Санкт-Петербурге // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 7. ч. 2. С. 2–6.
- 4 Kholodkevich S.V., Ivanov A.V., Kurakin A.S., Kornienko E.L., Fedotov V.P. Real time biomonitoring of surface water toxicity level at water supply stations // Journal of Environmental Bioindicators. 2008. V. 3. № 1, P. 23–34.
- 5 Кинебас А.К., Нефедова Е.Д., Гвоздев В.А., Холодкевич С.В., Иванов А.В., Куракин А.С., Корниенко Е.Л. Повышение эффективности и надежности биоэлектронных систем станций производственного биологического мониторинга качества воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 1. С. 20–27.
- 6 Иванов А.В., Холодкевич С.В., Куракин А.С. Самодиагностика биоэлектронных систем мониторинга окружающей среды в реальном времени // Системы контроля окружающей среды. Сборник научных трудов, НАН Украины, МГИ. – Севастополь. – 2012. – Выпуск 17. С. 26–31.
- 7 Kurakin A., Kholodkevich S., Ivanov A. Algorithm Development for the Self-Diagnosis Applied to the Bioelectronic Systems of the Real-Time Environmental Monitoring // Proceedings – 2015 4rd Mediterranean Conference on Embedded Computing, MECO. IEEE conference publications ISBN 978-9-9409-4364-6, Budva, Montenegro, 2015. P. 357–360.
- 8 Udalova G.P., Kholodkevich S.V., Fedotov V.P., Kornienko E.L. Changes in heart rate and circadian cardiac rhythm as physiological biomarkers for estimation of functional state of crayfish *Pontastacus leptodactylus* Esch. upon acidification of the environment // Inland Water Biology. 2012 V. 5. № 1. P. 119–127.
- 9 ГОСТ Р 8.734-2011. ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
- 10 Taymanov R., Sapozhnikova K., Danilova I., Druzhinin I. Multy-channel intelligent measuring systems // XXI IMEKO World Congress «Measurement in Research and Industry». Prague, Czech Republic, 2015, 5 p.

## ЭЛЕКТРОННЫЙ НОС – МЕЧТА ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ?

Рембеза С.И.<sup>1</sup>, Кошелева Н.Н.<sup>1</sup>, Рембеза Е.С.<sup>2</sup>, Свистова Т.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Воронежский государственный технический университет,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Воронежский государственный университет, г. Воронеж  
[rembeza@yandex.ru](mailto:rembeza@yandex.ru)

Анализируются возможности создания искусственного органа обоняния – Электронного Носа (ЭН). Описаны основные методы распознавания и контроля различных газов, базирующиеся на их характерных физико-химических свойствах. Рассмотрена возможная структура ЭН, а также реальность изготовления всех его компонентов. Со временем ЭН может заменить использование животных в сфере распознавания запахов наркотиков, взрывчатых веществ и других объектов.

Технический прогресс человечества обусловлен развитием новых технологий (микроэлектроника, информационные технологии и др.), следствием чего являются миниатюризация измерительной техники и расширение ее информационных возможностей. С большой пользой удалось воспроизвести и даже расширить мироощущения человека через аналоги таких органов чувств как зрение, слух, осязание и обоняние с помощью специальных приборов. В области зрения мы расширили свое восприятие природы от жесткого рентгеновского излучения до радиоволн, в области слуха – от ультразвука до инфразвука, однако в области обоняния наши успехи не столь значительны.

При восприятии запахов мы пока не можем полностью заменить приборами наших «братьев меньших» – собак и других животных, помогающих в поисках по запаху наркотиков, взрывчатых веществ, людей и других объектов. Однако, их использование очень дорого в связи с необходимостью длительного обучения, содержания и небольшого срока службы животных. Поэтому не вызывает сомнений необходимость разработки искусственного органа обоняния – Электронного Носа (ЭН). Правда, при его разработке мы не можем использовать миллионы рецепторов-датчиков как у живых существ, но создать прибор узкого назначения, например, для анализа состава газов в дыме котельных или для контроля запаха определенных видов пищевых продуктов – в настоящее время вполне решаемая задача. Кроме того, животные чувствуют только те газы, молекулы которых растворяются в слизистой оболочке носа, а ЭН будет определять газы, недоступные обонянию, например, собак.

В биологической обонятельной системе имеется набор первичных преобразователей – химических рецепторов, генерирующих сигналы в присутствии определенных газов, которые проходят первичную обработку

(усиливаются, фильтруются, кодируются) нейронами обонятельной луковицы. Затем газовая смесь анализируется и идентифицируется нейронной сетью головного мозга путем сравнения образа газа с имеющимися калибровочными данными, полученными при обучении нейронов.

В соответствии со структурой обонятельной системы электронный прибор типа ЭН должен содержать набор сенсоров газов, устройство их первичной обработки и более сложную структуру для распознавания мультисенсорного сигнала как многомерного образа определенного запаха (рис. 1) [1]. В современных мультисенсорных устройствах используются устройства с разными или одинаковыми принципами распознавания запахов.

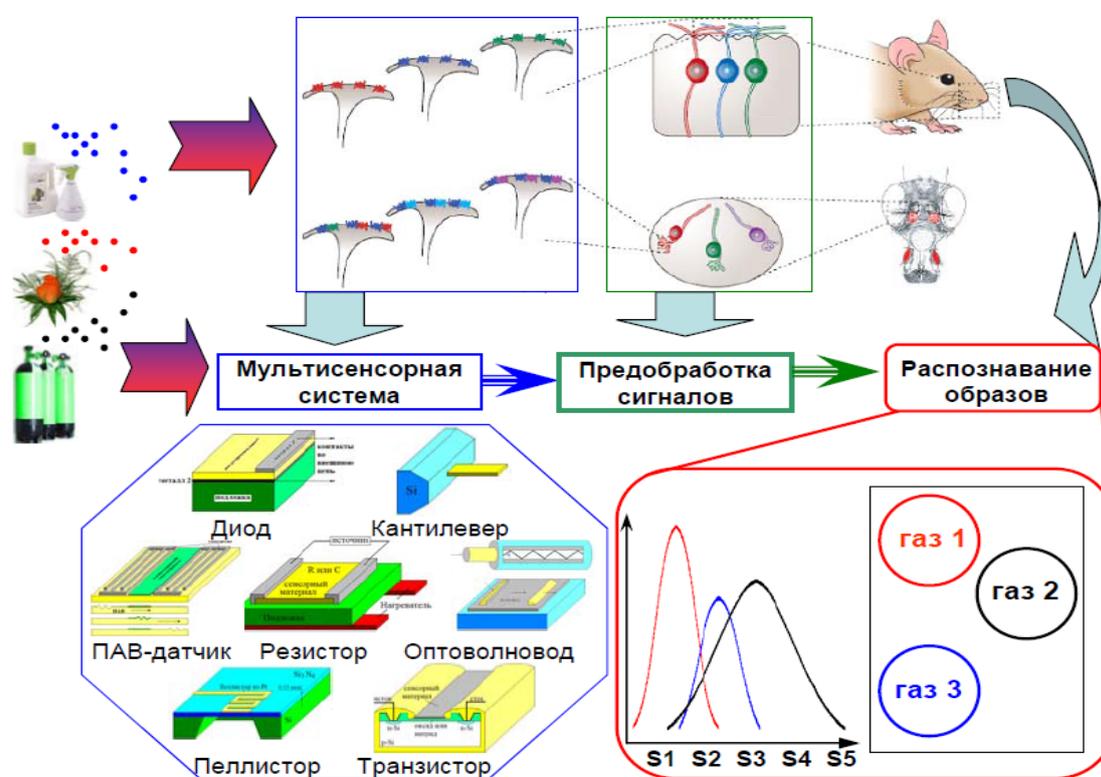


Рисунок 1. Концепция устройства прибора Электронный Нос [1].

Для обнаружения различных газов в воздушной среде используются различные физические и химические эффекты, возникающие при взаимодействии конкретного газа с сенсорным элементом измерительного прибора. При взаимодействии с газом сенсорный элемент может изменять свою теплоотдачу, температуру горения газа, электропроводность, электрический сигнал или величину оптического поглощения. Датчик газа содержит сенсорный элемент и электронную схему преобразования, усиления и индикации сигнала. Датчики газов характеризуются

чувствительностью к концентрации данного газа в воздухе (от долей ppm – одна молекула газа на  $10^6$  молекул воздуха, до объемных процентов 1 %об. =  $10^4$  ppm), а также селективностью – способностью отдельно или одновременно измерять несколько различных газов [2].

В настоящее время область применения датчиков газов – это контроль утечек в системах взрывобезопасности бытового и природного газа, в основном состоящего из метана и пропана; контроль содержания алкоголя в выдыхаемом водителем воздухе и контроль содержания окиси углерода в выхлопе автомобиля; контроль содержания метана в шахте, а также в ряде других применений. С помощью стационарных, портативных, автономных и простых в эксплуатации датчиков токсичных и взрывоопасных газов спасены миллионы жизней во всем мире.

Кратко рассмотрим принцип работы наиболее распространенных сенсорных элементов датчиков газов.

Топливная, или электрохимическая ячейка используется для контроля содержания кислорода или различных горючих газов. Элемент содержит два электрода и специальный электролит. В присутствии контролируемого газа между электродами возникает электрический заряд, величина которого пропорциональна концентрации измеряемого газа. Например, фирма Dräger выпускает электрохимические сенсоры для контроля концентраций кислорода и более 100 токсичных газов [3]. Широкому применению электрохимических сенсоров газов в мультисенсорных системах препятствуют их габаритные размеры и ограниченный срок службы.

Термохимические, или каталитические сенсоры (пеллисторы) используются для контроля горючих газов. Пеллистор (от английского pellet – пиллюля, и resistor – сопротивление) представляет собой две платиновые спирали с керамической оболочкой, одна из которых пропитана катализатором (соли Pt, Pd и др.). При помещении пеллистора в поток горючего газа и нагрев в воздухе двух спиралей, одна из которых для сравнения находится в воздухе, а вторая помещена в контролируемый газ, сгорающий на спирали с катализатором. Температура спирали с катализатором и ее электросопротивление возрастают пропорционально концентрации контролируемого газа [4]. Пеллисторные сенсоры находят применение в многокомпонентных газоанализаторах при контроле, например, состава котельных газов или других смесей газов [5].

Наиболее распространенным и универсальным сенсором газов является металлооксидный (полупроводниковый) сенсор, у которого при адсорбции молекул газа на поверхности изменяется величина электросопротивления пропорционально концентрации газа в воздухе [2]. Наибольшей чувствительностью к газам эти датчики обладают в интервале температур  $300\div 500$  °С, который можно изменить за счет использования

примесей-катализаторов. Изменение электросопротивления поликристаллического металлооксида ( $\text{SnO}_2$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.) при взаимодействии с газами, обусловлено реакцией газов с адсорбированным на поверхности кислородом, с изменением его зарядового состояния и потенциального рельефа для движения электронов через образец.

Запатентованный Тагучи (Япония) в начале 60-х годов XX века толстопленочный датчик газов на основе  $\text{SnO}_2$  до сих пор выпускается и успешно реализуется фирмой Figaro Ltd в Японии и в ее филиалах в других странах [6]. Металлооксидные полупроводники в датчиках газов можно использовать в виде тонкопленочных структур и в этом случае технология их производства хорошо сочетается с технологией изготовления изделий микроэлектроники. Например, изготовленный по микроэлектронной технологии на окисленном кремнии кристалл датчика газов размером  $1 \text{ мм}^2$  имеет тонкопленочный платиновый нагреватель и два тонкопленочных (на основе  $\text{SnO}_2$ ) сенсора [7]. Микроэлектронная технология позволяет не только изготавливать отдельные сенсоры, но и производить целые линейки из нескольких сенсоров, удобные для использования в газоанализаторах для контроля нескольких газов. С помощью легирования металлооксидных пленок различными примесями можно в широких пределах регулировать чувствительность и селективность сенсорных слоев к различным газам. Поэтому металлооксидные полупроводниковые сенсоры газов являются перспективным объектом для использования в системах ЭН.

Оптические методы распознавания газов основаны на анализе спектров инфракрасного (ИК) поглощения света, при его прохождении через анализируемый газ, которые обусловлены колебательными процессами атомов в молекулах газов. Поглощение ИК излучения будет наблюдаться, когда длина волны излучения совпадает с собственной частотой колебаний молекул. Метод удобен для контроля метана ( $\text{CH}_4$ ) и других молекул ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ), атомы которых имеют энергию колебаний в диапазоне длин волн  $3,1 \div 5,5 \text{ мкм}$ , в котором отсутствуют линии поглощения воды [8]. Селективность датчика обеспечивается применением специальных оптических фильтров.

Основные преимущества ИК-датчиков газа: работа при комнатной температуре и взрывобезопасность, возможность определения концентрации газов в диапазоне от 0 до 100 %, высокая точность измерений, хорошая чувствительность и селективность к разным газам. К недостаткам можно отнести сравнительно высокую цену ИК-датчиков по сравнению с пеллисторами и полупроводниковыми металлооксидными датчиками.

Первым этапом в разработке ЭН можно считать изготовление и выпуск газоанализаторов для контроля дымовых газов в промышленности. В настоящее время имеются разнообразные газоанализаторы

отечественного и зарубежного производства. Например, предлагаются [9] анализаторы дымовых газов систем отопления и промышленных газов серии Testo, позволяющие контролировать до 8 основных дымовых газов, а также их температуру, давление и скорость потока. При этом используются сенсоры на основе ИК-поглощения, электрохимических ячеек, теплообмена и другие.

Имеются образцы ЭН для анализа качества пищевых продуктов по их запаху [10]. Анализатор содержит 10 различных сенсоров на основе металлооксидных полупроводников, а также систему обработки сигналов по специальным программам. ЭН используется для контроля качества самых разнообразных продуктов: меда, кофе, сыра, молока, масла, разнообразных соков, фруктов, мяса, рыбы и т.п. Во многих случаях использование ЭН дает выигрыш по стоимости и по времени по сравнению с традиционными химическими методами анализа качества пищевых продуктов.

Будущее Электронного Носа будет зависеть не только от существующих методов газового анализа, но и от разработки принципиально новых методов распознавания газов, основанных на таких физических явлениях как дифференциальная спектроскопия подвижности ионов в электрическом поле [11] или поверхностно-стимулированная Рамановская спектроскопия [12]. Будут также совершенствоваться методы обработки и анализа сигналов датчиков газов. Например, на основе обучающихся нейронных сетей и на других новых принципах. Поэтому у Электронного Носа есть не только многообещающее настоящее, но и перспективное будущее.

## Литература

- 1 Сысоев В.В. Мультисенсорные системы распознавания газов на основе металло-оксидных тонких пленок и наноструктур. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Саратов. 2009. С.36.
- 2 Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение // Москва. 1989. С.196.
- 3 [www.draeger.com](http://www.draeger.com)
- 4 [http://gasdetection.ru/publ/tekhnologii/termokataliticheskie\\_datchiki\\_g\\_atanalizatorov\\_konstrukuja\\_i\\_princip\\_raboty/2-1-0-5](http://gasdetection.ru/publ/tekhnologii/termokataliticheskie_datchiki_g_atanalizatorov_konstrukuja_i_princip_raboty/2-1-0-5)
- 5 Лажков А.В. О влиянии неравномерного нагрева линейки термодатчиков на распознавание газовых смесей. Вестник ССТУ. Физика, радиотехника, электроника. 2013. № 1. С.39-43.
- 6 Figaro: Датчики газов. М. Изд. Дом «Додэка – XXI». 2002. С.64.

- 7 Рембеза С.И., Буслов В.А., Викин Г.А., Рембеза Е.С. Твердотельный интегральный датчик газов. Патент РФ. № 2257567. 19.05.2004.
- 8 Черненко А. Инфракрасные датчики газа SGX: путь к безопасности и энергоэффективности. Компоненты и технологии. 2015. № 7. С.40-42.
- 9 [www.test.spb.ru](http://www.test.spb.ru)
- 10 Benedetti S., Buratti S., Spinardi A., Mannino S, Mignani I. Electronic nose as a non-destructive tool to characterize peach cultivars and to monitor their ripening stage during shelf-life. Postharvest Biology and Technology. 2008. № 47. С.181-188.
- 11 Левин М.Н. Проект «Электронный нос» - разработка дифференциального спектрометра ионной подвижности. Новые технологии. 2014. № 5. С.4-9.
- 12 Fateixa S., Nogueira H. I. S., Trindade T. Hybrid nanostructures for SERS: materials development and chemical detection. Phys.Chem.Chem.Phys. 2015. V. 17. P. 21046-21071.

# THE IMPORTANCE OF MEASURING USER EXPERIENCE IN THE 21ST CENTURY: INNOVATIVE TECHNOLOGY CHALLENGE

Adrien. Lecossier<sup>1</sup>, Katy. Tcha-Tokey<sup>2</sup>, Simon. Richir<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *LAMPA laboratory, Arts et Métiers Paris Tech Angers, SOURIAU  
ESTERLINE, [adrien.lecossier@ensam.eu](mailto:adrien.lecossier@ensam.eu)*

<sup>2</sup> *LAMPA laboratory, Arts et Métiers Paris Tech Angers  
[katy.tcha-tokey@ensam.eu](mailto:katy.tcha-tokey@ensam.eu)*

## ВАЖНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ОПЫТА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ В 21 ВЕКЕ: ВЫЗОВ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Опыт пользователя – это понятие, широко распространенное в области исследований и среди практиков. Тем не менее, его измерение часто подвергается сомнению из-за субъективного характера. Измерение пользовательского опыта представляет собой техническую проблему, так как технологии, используемые для оценки восприятия пользователя на сегодняшний день, являются недостаточно разработанными. В этой статье показана важность разработки процедур измерения пользовательского опыта для определения величины, которая надежно характеризует способность пользователя к такому измерению. Рассмотрены результаты нескольких исследований, в которых предлагаются субъективные методы оценки пользовательского опыта. Показана роль нескольких методов измерения, существующих сегодня, включая электроэнцефалографические и электромиографические исследования, которые в некоторых случаях используются для объективной оценки пользовательского опыта (т.е. эмоций и аффектов). Проанализированы преимущества и недостатки этих методов. Даны рекомендации, показывающие, каким образом метрологические подходы могут помочь решить проблему измерения опыта пользователя. Поскольку в настоящее время достигнут большой прогресс в создании средств измерений, наиболее важной рекомендацией для надежного измерения опыта пользователя является сбор как субъективных, так и объективных данных, связанных с таким опытом. Объединение этих данных, в значительной степени, может помочь избежать предвзятости и уменьшить неопределенность.

### Abstract

User experience is a concept widely spread in the research field and among practitioners. Nevertheless, its measurement is often questioned due to its subjective nature, consequently minimizing the importance of user experience. Measuring user experience represents a technical challenge, as, technologies used to evaluate the user's perceptions to date are immature. In this paper we cover the importance of designing user experience measurement procedures in order to identify a reliable user experience measurand. We review several studies in which subjective user experience assessment methods are proposed. We also focus on

the few measurement techniques existing today such as electroencephalographic and electromyographic responses that, in some cases, are used to assess objective user experience (i.e., emotions & affects). Both type of methods present advantages as well as disadvantages. Therefore, we came out with several recommendations based on metrology definitions to show in which way the metrology concepts can reply to UX measurement problematics. According to the current technology maturity of the measurement means, the most important recommendation for reliable user experience measures is to gather subjective as well as objective data on UX. Crossing the data may help avoid as much bias and errors as possible.

## 1. Introduction

Technologies are at the heart of the 21st century revolution. They are more and more changing the way we work, learn and the way we define human. Recently, researchers have been trying to understand and master technologies through the concept of User eXperience (UX). ISO DIS 9241-210 tentatively defines UX as "*all aspects of the user's experience when interacting with the product, service, environment or facility*" [1]. The user is at the center is the watchword. This is why, UX has been in the last years an approach used in numerous disciplines (e.g., Human computer interaction (HCI), ergonomics, information architecture, branding, ...) to improve user-centric products or services. There is no reasonable doubt in the importance of UX in product quality. A specific product that highlights the importance of considering UX is virtual reality (VR), a technology greatly in vogue that provides applications to the general public. Studies show that UX consideration can alleviate the cybersickness (e.g., nausea, vertigo, disorientation, ...) affecting users in VR [2]. Moreover, today's technologies are more complex, they are fashionable, they stimulate the user's senses, they are immaterial. Therefore, early UX research strategy, rather than focusing on instrumental measures, focuses on more holistic subjective perceptions such as hedonic qualities, affects or emotions [3]. The Agarwal and Meyer study provided clear evidence of how studying emotion can add value to traditional user experience research [4]. Even if they used only subjective assessment, they show that for the same usability level, two computer applications can create different emotional results when they are used. Emotion even be opposed (pleasant against unpleasant for example). It confirms that the emotion caused by the observation of an object can in a second question its usability. This report is probably shared by the engineers at Renault. They would no doubt have appreciated having a way to evaluate the emotion when they designed the Renault Velsatis in 2002. On paper, everything seemed ideal: a high-end vehicle, full of technologies, competing with luxury German brands. But, they forgot to take into account the nefast emotion caused by a so futurist design, which resulted in an almost unprecedented commercial failure.

The analysis is clear: most UX evaluation methods are subjective, self-developed or not statistically validated [5]. There is an urge for clear measurement standards for UX evaluation. The current situation is alarming

since a product's intrinsic quality has to be objectively measured in order to be easily compared and controlled. Consequently, the main challenge UX is facing in this 21st century context, is to ensure that new products and services provide good UX to users. To do so, UX research needs to define measurands whether the UX criterion is hedonic (e.g., pleasure, motivation, satisfaction, ...) or instrumental (e.g., performances, usability,...).

In the remainder of this paper, we argue in favor of usability and emotions & affects being the two most common UX components studied among researchers. We define them in section 2 and we present subjective as well as objective assessment methods for both components in section 3. In section 4, we discuss recommendations to measure UX in line with the methods presented and the metrology definition of "measurement". Finally we conclude on future perspectives of our study.

## 2. Most Common User eXperience components

*"User experience involves a product/service (or a system in general), whereas experience does not require it. Watching a sunset is an experience, not user experience. User experience involves interacting (or the possibility to interact) with a system at some point, whereas 'experience' does not require it. "* [6]

UX is defined through a construct of components such as usability, emotion, enjoyment, visual aesthetic. The interaction with the product or system provides a set of emotions, a certain degree of enjoyment and visual aesthetic evaluation from the user. These UX components tend to vary in accordance with the field and the type of product or system they are connected to. Each component is strongly related to the user's perceptions. Usability is the most studied UX component because it historically allowed to obtain a more complete understanding of users' needs [7]. According to Bargas-Avila [5], emotion & affect is unsurprisingly the most assessed UX dimension because of the interrelationship between emotions states and decisions processes (e.g., purchase a product). Definitions and assessment methods of the two most common UX components (i.e., usability, emotions & affects) are presented in the following sections. Opposing instrumental (i.e., usability) and non-instrumental (i.e., emotions & affects) aspects of UX.

### 2.1. Usability Definition

Usability is generally defined as the ease of learning (i.e., learnability, memorization) and the ease of using (i.e., efficiency, effectiveness and satisfaction) [8]. User performances, the match of the system with the user's expectations, with the user's cognitive, motor and sensory abilities are other definitions that supplement the usability notion. This notion is strongly linked to HCI and ergonomic design. The study of usability during these last 20 years has contributed to place the user in the middle of the design process and has also systematise the practice of UX methods in several fields through certifications and ISO norms. To cite a few, the ISO-TR 16982, 2002 and the ISO 20282-1,

2006 norms concern usability methods intended for user centered design practitioners. Linked to the user's performances and skills, usability is associated with the instrumental and pragmatic aspect of UX measure [9]. It is a necessary component, but measuring usability alone is not enough to ensure a reliable usage of interactive systems. For the last years, research on non-instrumental or hedonic aspects of the UX assessment (e.g., emotions & affects, subjective judgement, pleasure, ...) are flourishing with the ambition of understanding man-system relationship better.

### 2.2. *Emotions & affects Definition*

Emotion is seen as any mental experience with high intensity and high hedonic content (pleasure/displeasure). Two main theories structure emotions & affects. Ekman's theory [10], exposes five basic emotions which are anger, fear, joy, sadness and disgust. Whereas Russell's theory [11] exposes affects through a "circumplex" model of two independent dimensions: activation/deactivation of the affect and pleasant/unpleasant affect (e.g., a pleasant and deactivated affect would be "relaxed", a pleasant and activated affect would be "excited", a unpleasant and deactivated affect would be "bored", a unpleasant and activated affect would be "tense"). For psychologists [12], emotion is "*a complex psychological reality that involves cognitive appraisal processes of information flow being internal or external to the individual, associated with sensations of excitement and pleasure (or displeasure), physiological changes, emotional behaviours with a specific goal.*"

## 3. UX Assessment

As UX mainly concerns the user, the "simple way" of assessing its dimensions consist of asking him or her, through several methods (see 3.1) to what extent he perceives certain UX components. In this way all aspects of the UX (e.g., emotions, perceived efficiency, perceived effectiveness, satisfaction ...) can be assessed.

### 3.1. *Subjective Assessment Methods*

UX is seen as a subjective dimension as the result of its evaluation is specific to the user's personality or to the evaluator's experience. A majority of subjective UX assessment methods are used in UX evaluation. Usability inspection methods, questionnaire methods, scale or observation are example of the most used methods.

#### *Usability assessment*

There are as many tools as fields of study to evaluate usability. For example, Nielsen [13] developed in 1993 heuristics for User Interface Design to assist designers in the assessment of the interface. He proposed seven important usability principles to counter usability problems in the design: visibility of system status (e.g., "*provide status information*"), match between system and real world (e.g., "*contains familiar terms and natural language*"), user control and freedom (e.g., "*obvious way to undo actions*"), consistency and standards

(e.g., “uniform command syntax”), error prevention (e.g., “understand the user’s language”), recognition rather than recall (e.g., “make the repertoire of available actions salient”), flexibility and efficiency of use (e.g., “user interface should be customizable”). These criteria are inspected by each designer without any need of users.

Other than inspection methods, questionnaires methods are used to assess usability with users. Usability questionnaires can be specific to a system (e.g., mobile phones, augmented reality). For example, Ryu [14] developed a Mobile Phone Usability Questionnaire (MPUQ) focusing on some usability dimensions such as: ease of learning and use, assistance with operation and problem solving, emotional aspect and multimedia capabilities, commands and minimal memory load, efficiency and control and typical tasks for mobile phones. This quite modern questionnaire takes into account new usability concepts such as “emotional usability”, “attractiveness”, “sensuality”, “pleasure and displeasure in product use”. The questionnaire is composed of 72 items.

The System Usability Scale (SUS) is a questionnaire created in the 1986 as a “quick and dirty method” of only 10 items [15]. Nevertheless it has been a very successful questionnaire used a considerable number of times by practitioners due to its adapted size and ease of use for the industrial context.

Observation methods in the user’s environment are one more type of subjective methods. Users are observed by experts who evaluate usability according to their own subjective criteria [16]. The sessions may be followed by a discussion with the user or among experts so as to gather more information. This helps to avoid some bias by considering the experts as having together a more objective vision.

In their study, Sauro et Kindlund alert on the number of usability assessment methods and mention the usability irony: usability metrics need to be easier to use“ [17]. This is why, they propose a quantitative approach of usability measure that Standardize Usability Metrics (SUM) into a single score. Their score is based on three properties which are efficiency, effectiveness and satisfaction combining subjective (i.e., average satisfaction) as well as objective measures (i.e., time, number of errors, completion). They conclude that SUM can never replace all the information inherent in the various component metrics that compose the three properties. However like a FICO score, an IQ score or even the Richter scale, SUM has the ability to provide high-level summary information about a complex construct in four integral summative usability measures (i.e., average satisfaction, time, number of errors, completion) [17].

#### *Emotion & affects assessment*

Measuring emotion is one of the most vexing problems in affective Science according to researchers. In their chapter “Assessing emotion by questionnaire”, Harald et al. [18] assume that questionnaires may be the best suited self-report technique to assess conscious emotional experience. They

present their own “emotional experience” questionnaire based on theoretical considerations. According to them, emotion is generally induced in three types of settings: in a laboratory, in real life observation or when asked to recall a past experience. Their questionnaire is to be used to study four types of emotional experience (i.e., joy/happiness/pleasure, sadness/sorrow/grief, anger/bad temper/rage) in a situation to recall. The emotions were presented through pictorial representations. The questionnaire was developed to assess three types of characteristics: description of the situation, description of the emotional reaction and control of the emotion.

The self assessment manikin (SAM) is only based on the pictorial representations. It is described in Bradley and Lang’s study as a nonverbal assessment technique that directly assesses pleasure, arousal and dominance associated with a person’s affective response to an object or event [19]. In their study, they point out the advantages (e.g., no translation needed) of SAM compared to a semantic differential scale. SAM has been developed in 1980 and has inspired many other emotional instrument such as the Product Emotion Measurement Instrument (PrEMo) that uses cartoons instead of classical pictorial representations [20].

Recently, the Pleasure, Arousal and Dominance (PAD) semantic differential scale to assess affect and drive was translated in french [21] from the well established tool of Mehrabian and Russell [22]. They defined pleasure (unpleasure) as feelings ranging from unhappiness to extreme happiness. They used bipolar pairs of adjectives such as “pleased/annoyed” or “happy/unhappy” to evaluate the user’s pleasure (unpleasure). Arousal is described as a mental activity identified through a single dimension ranging from sleep to excitement. The bipolar pairs of adjectives identifying the activities are for example “stimulated/relaxed” and “excited/calm”. And dominance is related to sense of control ranging from dominant to submissive, it is represented by the bipolar pairs of adjectives such as “controlling/controlled” and “important/awed”.

Another approach in assessing emotion is to study the variation of its intensity, indeed some people tend to be driven by a higher need for stimulation when they are placed in a poorly arousing context [23]. The Affect Intensity Measure (AIM) created in 1987 was also recently used in an evaluative process study. The AIM measures the intensity with which emotion is experienced by people engaged in an evaluative process. The scale is defined through five subscales: the Intrapersonal Positive Affect I (IPA I; intensity of positive emotions experienced with high energy), the Intrapersonal Positive Affect II (IPA II; intensity of positive emotions experienced with exuberance), the Negative Reactivity (NR; the reactivity to negative events), the Serenity (S; reactivity to positive events with weak excitability (calmness)), and the Negative Intensity (NI; intensity of negative emotions (anger, stress, nervousness)).

The subjective methods described previously are mostly related to laboratory setting. An approach to study emotion in the field was presented by Csikszentmihalyi and Larson [24] to counter the possible bias of laboratory settings. The Experience Sampling method (ESM) consist of describing variations (i.e., frequency, intensity, patterning) in real life of psychological processes (e.g., emotion) in self-reports.

#### 3.1.1. Subjective Assessment Advantages

The subjective evaluation of the UX aims, in a sense, at evaluating the parameters that an "objective measure" is today unable to perform. We have seen in the previous subjective assessment methods of usability and emotions & affects that they present obvious advantages. For example, the ability of questionnaires to evaluate the user's opinion, beliefs and thoughts. No methods other than subjective ones are known to do so. Another advantage is the ease of use of questionnaires or scales to evaluate an experience. Indeed, no specific knowledge is needed as researchers propose most of the time well studied intelligible items, nor specific means of measurement are needed, basically, the questionnaires or scales available could just be downloaded or printed for any use once they are implemented. Pictorial representations of emotions are even easier to use worldwide as no language translation is needed. In the heuristic evaluation methods only one experienced evaluator is needed, few ressource is mobilized as no user's are necessary. Furthermore, methods such as questionnaires or scales can be performed remotely and this way, easily gather a large user participation rate (e.g., 500 participants) in a few period of time (e.g., two weeks).

#### 3.1.2. Subjective Assessment Disadvantages

Even if today, subjective methods are still the most accurate way to evaluate perceived UX, they are also costly, time-consuming and very complex to implement due to the need of preliminary experiments, purchased resources (e.g., materials, academic papers) and the involvement of human end users. For example, in Lecossier et al.'s work, they evaluate UX quality throughout an innovation process [25]. During this process, the same users must respond to a combination of seven surveys (i.e., 85 items). This can obviously cause some weariness, which does not occur with "quick and dirty" methods of fewer items (i.e., 10) such as the SUS. Nevertheless, the questionnaire or scale with very few items may miss the relevant information in the user's experience. And even the questionnaire or scale with too many items, however reliable it is, may cause a bias resulting from random responses: the user responds randomly to the last set of items in order to cut down their tiredness [26]. Tcha-Tokey et al. also identified similar costly stages in the validation process of their questionnaire [27]. As for observation and heuristic evaluation methods, the bias may not come from the user but from the expert himself or herself, depending on his experience, mood, and own interpretation. Another complexity is the numerous

different versions of questionnaires or scales obeying to different criteria used to evaluate a single UX components such as usability or emotions in studies. This makes comparisons of results very difficult and leads to few common understanding of the UX notion among researchers. Nevertheless, interest for UX is steadily increasing even if subjective evaluation methods such as questionnaires are neither sustainable nor applicable [5] on a large scale. In addition, no real innovations are made in subjective methods, some questionnaires are still used 30 years later, they thus, can often be called into question because of the frequent increase of breakthrough innovations in the technology they evaluate. In order to put an end to these difficulties, some research study the UX as a physical phenomenon by proposing new measurement models. The next chapter reviews these new methods used to measure the most common UX components: usability and emotion & affects. Table 1 presents a summary of subjective assessment methods for the emotion & affects and the usability UX components.

Table 1: Examples of subjective assessment methods according to the most common UX components, usability and emotions & affects

<b>Component</b>	<b>Method</b>	<b>type</b>	<b>Sources</b>	<b>System assessed</b>
Usability	Nielson's Usability heuristics	Heuristic evaluation	Nielson, 1994	User interface
	MPUQ	Questionnaire	Ryu, 2009	Mobile phone
	SUM	Measure and questionnaire	Sauro, 2005	Interactive Systems
	SUS	Scale	Brooke, 1986	Interactive systems
	Observation of users by experts	Observation	Tong et al., 2015	Game-based screening tool
Emotions & affects	Emotional experience questionnaire	Questionnaire	Harald et al., 1989	All
	SAM	Pictorial representation	Lang, 1985	All
	PrEMo	Cartoon representation	Desmet, 2005	All

	PAD Semantic differential scale	Differential scale	Mehrabian and Russell, 1974	Images
	AIM	Scale	Larsen and Diener, 1987	Textile (car seats)

### 3.2. Objective Assessment Methods

Even though a majority of subjective UX assessment methods are used in UX evaluation, UX is more and more seen as a dimension that can be assessed objectively. Assessing UX objectively is focusing on UX components such as usability or emotions & affects on one side and on metrics (or measurand) associated to each component such as frequency or time on the other side. Several methods and instrument exposed below do provide interesting objective results.

#### *Usability assessment*

Objective UX assessments have often been about user performances based on actual usage. Indeed, Brooks and Hestnes identified several measurands to evaluate the usability of media interfaces (e.g., game score, game duration, mouse clicks, time between mouse clicks, ...) [28]. Just like Frøkjær et al. [29], who consider efficiency, effectiveness and satisfaction as independent usability dimensions, given that they capture different aspects of usability. For example, indicators of efficiency include time completion and learning time, indicators of effectiveness include quality of solution (i.e., outcome of user's interaction with the system, for example grade, score or task accuracy) and error rates, finally, indicators of satisfaction include subjective assessment methods such as attitude (e.g., preferences or acceptability of the service) rating scales. Frøkjær et al. recommend to measure all three aspects of usability, confirming an important observations: objective evaluations of usability are necessarily carried out additionally to subjective evaluations due to the subjective nature of the satisfaction aspect of usability. Moreover, the authors suggest to define usability measurement principle according to the application domain and context of use so as to uncover the measures that are specific to the particular situation.

In other fields such as virtual reality, or games within which interaction are becoming more complex with different interaction paradigms (e.g., gesture interaction, speech recognition, 3D navigation, ...), similar measurands are also used. Number of errors, score, level reached, time completion are measures usually chosen to objectively evaluate the usability [27]. Nevertheless, measuring usability in games with a scenario of several hours can quickly be a demanding work. Brinkman et al. provides a possible solution. They try to optimize objective measurement techniques by reducing the number of participants [30]. To achieve this, the authors use the Layered Protocol Theory,

which decomposes the user-system interaction into different layers that can be designed and analysed separately (subsystem). For example, the usability of a radio alarm clock can be decomposed by measuring the usability of each of its subsystems (e.g., clock button, volume button, radio station buttons, ...). For each subsystem, the number of user interactions performed to accomplish a task is measured. The measurement model use a differential measurement method considering the first measure as an etalon. The system or subsystems can then be modified and again tested in order to measure the resulting usability. The study shows that by using a differential measurement method, the number of participants can be reduced by 60%, meanwhile obtaining reliable results, just as other usability assessment protocols.

#### *Emotion & affects assessment*

Numerous methods are emerging to assess UX in a more “technically advanced” way compared to subjective methods, especially when it comes to emotions & affects, an non-physical quantity characterizing human. Experiencing emotions generates a variety of physiological reactions that can be measured with a diverse set of instruments.

One of these instruments is an electroencephalography (EEG). In their study, Taymanov et al. use an EEG to register neurophysiological reaction induced by an emotional state. They show the correlation between neurophysiological reaction and basic emotions caused by an acoustic stimuli [31].

Each emotion (e.g., anger, sadness, joy, ...) is associated with a particular pattern of facial and vocal expressions. For example, anger is linked to a state, contracted eyebrows, compressed lips, vigorous and brisk movements and can be accompanied with a raised voice or speech, sometimes shoutings. Based on facial expression theories, instruments such as facial electromyographic activity (EMG) can link expression features to distinct emotions. Mahlke and Minge [32] used facial EMG among other methods to measure different components of emotional experience (e.g., cognitive appraisal, motor expression, physiological reactions) in an interactive context.

Another similar approach is based on vocal cues. For example Batliner et al. developed the Monitoring of User State Emotion (MoUSE) instrument to identify trouble (i.e., negative emotion) in communication thanks to emotional markers in the speaker’s voice [33]. They tried to adapt their instrument to realistic scenarios by combining adequate knowledge sources (e.g., prosodic features, repetition, reformulation, dialogue act sequences).

Heart activity is also an emotional indicator registered through an electrocardiographic (ECG) instrument. There are a variety of parameters for analyzing and interpreting the raw signal of a ECG. Common parameters are heart rate, interbeat interval and heart rate variability which can indicate positive or negative valence. Westerink et al. [34] combined ECG with Skin

Conductance Response (SCR), a physiological measure of psychological and autonomic arousal, for more accurate results. They built an emotions measurement platform for real-life situations in contrast with psychological techniques usually validated in laboratory situations. They show that emotional experience can be measured in an relatively unobtrusive way.

The Autonomic Nervous System (ANS) designates all systems with sympathetic and parasympathetic branches, which are generally associated with activation and relaxation, respectively. The most commonly assessed indices of ANS activation are based on electrodermal (i.e., sweat gland) or cardiovascular (i.e., blood circulatory system). There are rich theories and understanding of how the brain and ANS interact in generating, regulating, recognizing and responding to emotion [35].

### 3.2.1. Objective Assessment Advantages

The objective assessment of UX has several advantages compared to subjective assessment. First, it allows direct evaluation (i.e., during actual usage) without interrupting the user's interaction with the system. Second, certain users bias are avoided (e.g., random responses, memory loss) during the evaluation of the interaction, indeed, users do not have to recall their experience in order to express their opinion which by definition is subjective. Third, the objective assessment of UX is by its own nature more reliable than subjective assessment. Finally, research on objective UX and in particular emotion & affects are leading to great innovations. For example, new assessment techniques such as electroencephalogram-based emotion recognition are developed; new research fields, primarily based on these objective measures, such as "affective computing" or "Brain-Computer Interaction" (BCI) are arising and new scopes of research are emerging in several fields such as Artificial Intelligence (AI), hedonic systems, domotics, robotics with the ambition to build applications, so called "empathic applications" (e.g., conversational agents, human-like robots, intelligent homes, ...).

### 3.2.2. Objective Assessment Disadvantages

Although objective assessment methods do not involve the use of questionnaires, their interpretation is complex, especially for the emotional component. The measure of brain activity requires the use of unusual good quality materials, thus expensive. Furthermore, this material can be invasive for the user and constraining to use in real life [34]. Besides the material aspect, the physiological measures are still imprecise. Actually, facial expression, heart rate or brain activity are correlated to inaccurate emotional standards for several reasons. First, emotion is impacted by user's characteristics such as culture, âge, experience... these specificities are not taken into account in most studies. Second, emotions are constantly evolving during a single activity, it is difficult to precisely follow the "palette" of emotions once drowned by the activity, history of people, upbringing, education, belonging to a definite socio-culture

group, etc. Third, these physiological methods show inconsistent results for predicting emotional valence for example in human-computer interaction. While some authors associate a decrease of heart rate with negative valenced situations, other authors found a positive correlation between heart rate and valence. Heart activity seems to be a more reliable indicator for arousal and mental workload than for emotional valence [34]. Fourth, brain activity is influenced by many various random factors of physiological and cognitive character, such as respiration, muscle activity, tiredness, attraction of attention to irrelevant thoughts or side impacts, etc. It is rather hard to diminish their influence during the experiments [31]. Finally, usability measurement must include efficiency, effectiveness and satisfaction measures to be reliable. However, as satisfaction is necessarily evaluated subjectively, it appears that usability cannot be entirely measured, to date.

Table 2 presents a summary of objective measurement methods for the emotion & affects and the usability UX components.

Table 2: Examples of measurement methods according to the fundamental UX components: usability and emotions & affects

<b>Component</b>	<b>Method</b>	<b>Measurand</b>	<b>Sources</b>	<b>System assessed</b>
Usability	System Tracking	Time completion, learning time	Frøkjær et al., 2000	All
		Mouse click, time between clicks	Brooks & Hestnes, 2010	Computing
		Error rate, number of errors	Frøkjær et al., 2000; Tcha-Tokey et al., 2016	All
		Quality of the solution (grade, score, level reached, task accuracy)	Frøkjær et al., 2000; Brooks & Hestnes, 2010; Tcha-Tokey et al., 2016	Games
Emotions & affects	EEG	Neurophysiological activity	Taymanov, 2016	Acoustic
	EMG	Facial expression	Mahlke & Minge, 2008	Human-technology interaction
	MoUSE	Vocal expression	Batliner et al., 2003	Automatic dialogue system

				(call center)
	ECG	Heart rate	Westerink, 2009	Everyday life
	SCR	Electrodermal activity	Westerink, 2009	Everyday life
	ANS	Electrodermal / cardiovascular	Ax, 1953	Health, wellbeing

#### 4. UX Measurements Recommendations

In the field of electrical measurement, the measure of the electrical current is reliable since it is characterized by a standard. Alike the electrical current measurement, every reliable measure follows three main criteria [36] :

1. its measurement procedure is defined by measurement principles, a measurement method and a measurement model (cf. measurement procedure in the VIM). For example, during a steady-state operation, the electrical power measurement can be realized by an indirect measurement method using both an ammeter and a voltmeter. This measurement method is based on the measurement model “the power is equal to the voltage multiplied by the current” which uses the voltage and current measurement principles.
2. the measure is objective and reproducible (cf. measurement reproducibility in the VIM),
3. it effectively assessed the corresponding measurand (cf. measurement accuracy in the VIM).

Our analysis is that, despite the large amount of studies on UX measurement and despite the numerous set of measures proposed, most of these studies do not focus on the quality of the measure according to the metrological definitions.

(1) From our point of view, most of UX measurement procedures are incomplete. Indeed, measurement principles and methods are often proposed, but finally no measurement models are clearly defined and validated for any UX component. Neither are defined logical relations between all quantities known to be involved in the UX measurement.

*Recommendation (1):* According to this statement, our first recommendation would be to gather and compare the numerous measurement principles and methods used in UX studies to date, and identify or create measurement models for each UX component. This approach will lead to reliable measurement procedures. In this way, measurement results could be compared even if they result from different applications. We also suggest to explore “unified” UX measurement models that study the correlation between UX components (or

subcomponents) such as usability (i.e., effectiveness, efficiency, satisfaction) and emotion & affects.

(2) We noticed that, UX is a subjective notion by its own nature and therefore most UX component assessments are subjective and few are objective. Subjectivity makes the assessments results hardly reproducible, therefore creates coexistence of several interpretations for the same type of studies. We exposed that more and more objective assessments are being developed for the emotion component and for some of the usability aspects. Even if the emotion is measured, the measurement result is still expressed qualitatively (i.e., positive or negative valence) because no quantity are clearly linked to the measure of emotion.

*Recommendation (2):* Our recommendation would be, first, to identify more measurands from the already existing subjective UX studies. Second, to define more measurands for the usability aspects especially for the satisfaction for which no objective methods are defined. Third, to work on quantitative measures for emotion & affects. And finally, to provide the tools and environment that work best for the reproducibility of the measurements.

(3) As the usability measurement procedure is still not clear, it can be often seen in studies, that usability is measured through an incomplete set of measures, neglecting other usability facets. This, strongly compromises the measurement accuracy. As long as no standard measurement procedure of usability is defined, usability evaluation will probably cause false measurement results, or results that do not actually define usability. The usability measurement procedure could be susceptible to changes in order to adapt to targeted range of systems [29]. As for the emotion & affects, we discovered that the emotion measurement accuracy is investigated in several fields, and some encouraging results are emerging in the metrology field [31].

*Recommendation (3):* In order to solve these difficulties, we would like to suggest that fundamental researches focus on a development of a standard methodology in order to help researchers and practitioners to develop their own usability measurement procedures according to the range of applications they evaluate. Moreover, applicative researches need to implement new generation of emotion-based materials (e.g., emotional platform with a combination of physiological sensors included) in order to facilitate the emotion measurement.

*Recommendation (4):* In the meantime, the most important recommendation for reliable user experience measures would be to gather as much subjective as well as objective data on UX possible. Actually, crossing the data may help avoid bias, inaccuracy and uncertainty in a certain degree in the measurement results.

## 5. Conclusion

This paper has presented various subjective and objective methods that are used, to date, to evaluate the usability and the emotions & affects UX components.

We then identified the main points that prevent UX measure from being considered reliable, and brought recommendations based on the metrology definitions to show in which way the metrology concepts can replies to UX measurement problematics. Ideally, the quality of the UX should be measured objectively, yet subjective methods are most used. Indeed, current objective measurement methods are still immature, in particular for the emotion measure. Moreover, emotion & usability measurement procedure standards should be clearly defined and adapted as much as possible to all contexts. In the meanwhile, for reliable user experience measures gathering subjective as well as objective data on UX may be the most cautious procedure. Indeed, crossing the data may help avoid as much bias and error as possible.

Moving towards this type of progress also needs to take a closer look at the ethical question that bears the passive measure of a user's emotion.

We hope that this study opens new scopes of research between the metrology and the user experience fields.

#### Authors' Contributions

Adrien Lecossier and Katy Tcha-Tokey are co-first authors, they contributed equally to this work.

#### References

- 1 ISO DIS 9241-210:2008. Ergonomics of human system interaction - Part 210: Human-centred design for interactive systems (formerly known as 13407). International Organization for Standardization (ISO). Switzerland.
- 2 Lin, J. J., Abi-Rached, H., & Lahav, M. (2004, April). Virtual guiding avatar: An effective procedure to reduce simulator sickness in virtual environments. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 719-726). ACM.
- 3 Scapin, D. L., Senach, B., Trousse, B., & Pallot, M. (2012). User experience: Buzzword or new paradigm? ACHI 2012 - 5th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, (January), 336–341
- 4 Agarwal, A., & Meyer, A. (2009). Beyond usability: evaluating emotional response as an integral part of the user experience. *Proceedings of the 27th International Conference*, 2919–2930. <http://doi.org/978-1-60558-247-4/09/04>
- 5 Bargas-Avila, J. a., & Hornbæk, K. (2011). Old wine in new bottles or novel challenges: A critical analysis of empirical studies of user experience. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'11), 2689–2698.
- 6 Roto, V. (2007). User Experience from Product Creation Perspective. *Towards a UX Manifesto COST294-MAUSE, September*, 31-34
- 7 N. Bevan (2008). Classifying and Selecting UX and Usability Measures. Proceedings of the International Workshop on Meaningful Measures: Valid Useful User Experience. Reykjavik, Iceland, June 2008
- 8 Abran, A., Khelifi, A., Suryan, W., & Seffah, A. (2003, April). Consolidating the ISO usability models. In *Proceedings of 11th international software quality management conference* (Vol. 2003, pp. 23-25).

- 9 Hassenzahl, M., & Tractinsky, N. (2006). User experience-a research agenda. *Behaviour & information technology*, 25(2), 91-97.
- 10 Ekman, P. (1992). An argument for basic emotions. *Cognition & emotion*, 6(3-4), 169-200.
- 11 Ressel, J. A. (1980). A circumplex model of affect. *J. Personality and Social Psychology*, 39, 1161-78.
- 12 Piolat, A., & Bannour, R. (2008). Emotions et affects: contribution de la psychologie cognitive. *Le sujet des émotions au Moyen Age*, 53-84.
- 13 Nielsen, J. (1994, April). Enhancing the explanatory power of usability heuristics. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 152-158). ACM.
- 14 Ryu, Y. (2009). Mobile phone usability questionnaire (MPUQ) and automated usability evaluation. *Human-Computer Interaction. New Trends*, 349-351.
- 15 Brooke, J. "System usability scale (SUS): a quick-and-dirty method of system evaluation user information." *Reading, UK: Digital Equipment Co Ltd* (1986).
- 16 Tong, T., Chignell, M., Sieminowski, T.(2015). Case study: a serious game for neurorehabilitation assessment. *Procedia Comput. Sci.* 69, 125–131
- 17 Sauro, J., & Kindlund, E. (2005). A method to standardize usability metrics into a single score. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '05)*, 401–409. <http://doi.org/10.1145/1054972.1055028>
- 18 Plutchik, R., & Kellerman, H. (Eds.). (2013). *The measurement of emotions* (Vol. 4). Academic Press.
- 19 Bradley, M. M., & Lang, P. J. (1994). Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of behavior therapy and experimental psychiatry*, 25(1), 49-59.
- 20 Desmet, P. (2005). Measuring emotion: Development and application of an instrument to measure emotional responses to products. *Funology*, 111-123.
- 21 Detandt, S., Leys, C. & Bazan, A., (2017). A French Translation of the Pleasure Arousal Dominance (PAD) Semantic Differential Scale for the Measure of Affect and Drive. *Psychologica Belgica*. 57(1), pp.17–31. DOI: <http://doi.org/10.5334/pb.340>
- 22 Mehrabian, A. and Russell, J. A. (1974). *An approach to environmental psychology*. Cambridge, MA: MIT.
- 23 Kergoat, M., Giboreau, A., Nicod, H., Faye, P., Diaz, E., Beetschen, M. A., & Meyer, T. (2016). Affect intensity and softness tactile preferences: An experimental approach to arousal regulation. *Food Quality and Preference*, 52, 120-123. Measurement (VUUM)
- 24 Csikszentmihalyi, M., & Larson, R. (2014). Validity and reliability of the experience-sampling method. In *Flow and the foundations of positive psychology* (pp. 35-54). Springer Netherlands.
- 25 Lecossier, A., Pallot, M., & Richir, S. (2017). UX-FFE Model: An Experimentation of a new innovation process dedicated to a mature industrial company. In ICE 2017. Madeira Island.

- 26 Gogol, K., Brunner, M., Goetz, T., Martin, R., Ugen, S., Keller, U., ... & Preckel, F. (2014). "My Questionnaire is Too Long!" The assessments of motivational-affective constructs with three-item and single-item measures. *Contemporary Educational Psychology*, 39(3), 188-205.
- 27 Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and Validation of a Questionnaire to Measure the User Experience in Immersive Virtual Environments. *The International Journal of Virtual Reality*, 16(1), 33-48.
- 28 P. Brooks and B. Hestnes, "User measures of quality of experience: Why being objective and quantitative is important," *IEEE Netw.*, vol. 24, no. 2, pp. 8–13, 2010.
- 29 Frøkjær, E., Hertzum, M., & Hornbæk, K. (2000, April). Measuring usability: are effectiveness, efficiency, and satisfaction really correlated?. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 345-352). ACM.
- 30 Brinkman, W.-P. ., Haakma, R. ., & Bouwhuis, D. G. . (2005). Empirical usability testing in a component-based environment: Improving test efficiency with component-specific usability measures. *Lecture Notes in Computer Science*, 3425, 20–37.
- 31 Taymanov, R., Baksheeva, I., Sapozhnikova, K., & Chunovkina, A. (2016). Measurement model as a means for studying the process of emotion origination. *Journal of Physics: Conference Series*, 772(December).
- 32 Mahlke, S., & Minge, M. (2008). Consideration of multiple components of emotions in human-technology interaction. In *Affect and emotion in human-computer interaction* (pp. 51-62). Springer Berlin Heidelberg.
- 33 Batliner, A., Fischer, K., Huber, R., Spilker, J., & Nöth, E. (2003). How to find trouble in communication. *Speech communication*, 40(1), 117-143.
- 34 Westerink, J., Ouwerkerk, M., de Vries, G. J., de Waele, S., van den Eerenbeemd, J., & van Boven, M. (2009, September). Emotion measurement platform for daily life situations. In *Affective Computing and Intelligent Interaction and Workshops, 2009. ACII 2009. 3rd International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- 35 Levenson, R. W. (2014). The autonomic nervous system and emotion. *Emotion Review*, 6(2), 100-112.
- 36 International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms, 3rd ed., 2008 version with minor corrections, BIPM, JCGM 200, 2012.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ ПОСТОЯНСТВА ОСИ ВРАЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИХ ТОЧНЫЕ РОТАЦИОННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Радев Х.К., Богев В.Й., Василев В.А., Благов И.Х.

*Технический университет – София*  
hradev@tu-sofia.bg

Постоянство оси вращения является основным требованием к объектам, осуществляющим точные ротационные движения (предметные столы кругломерных приборов, ротационные модули измерительных систем или станков и др.).

Отклонение от постоянства оси вращения оценивается через радиальное, аксиальное и угловое биения оси.

Рассматриваются четыре нереверсивных метода оценки биения оси вращения, нашедшие применение в метрологической практике. Оценивается радиальное, аксиальное и угловое биения оси вращения двух ротационных модулей, характеризующихся значительной разницей в точности вращения. Оценка осуществляется использованием каждого из четырех методов при одинаковых условиях измерения, что позволяет сравнить метрологические и эксплуатационные возможности исследуемых методов.

## 1. Введение

Постоянство оси вращения, является основным требованием к объектам, осуществляющим точные ротационные движения (предметные столы кругломерных приборов, ротационные модули измерительных систем или станков и др.).

Отклонение от постоянства оси вращения оценивается через т.н. «блуждающее биение» (радиальное, аксиальное и угловое).

Блуждающее биение, в данной плоскости или направлении, рассматривается как геометрическое место точек мгновенной оси вращения объекта и представляет собой, соответственно, сложную замкнутую кривую или совокупность точек, расположенных по линии измерения.

Количественно блуждающее биение оценивается через размах отклонений относительно виртуальной базы или через мгновенные положения оси относительно виртуальной базовой оси.

Виртуальная базовая ось – это прямая, в данной координатной системе XYZ, проходящая через центры тяжести точек мгновенной оси вращения в двух любых, отдаленных друг от друга параллельных плоскостях XOY. Ось вращения ориентирована по оси Z. Положение мгновенной оси вращения, является функцией угла  $\varphi_i$  вращения объекта относительно виртуальной базовой оси.

Все три вида блуждающего биения имеют свою систематическую и случайную составляющую, которые могут быть оценены при многократном измерении и соответствующей статистической обработке полученных результатов измерений.

Оценивание биения оси основывается на результатах измерения биения плоских или сферических поверхностей эталонных деталей (стеклянной интерференционной пластины или стеклянной полусферы), установленных определенным способом на вращающихся элементах соответствующих объектов [1, 2]. Последующая обработка этой первичной измерительной информации осуществляется по определенным алгоритмам, использующим в одной или другой форме Фурье-анализ.

В случаях, когда значение отклонения формы поверхностей эталонных деталей соизмеримо со значением биения, особенно при измерениях в нанометровом диапазоне, используются реверсивные методы (например, реверсивные методы Дональдсона и Естлера) [2-5]. При реверсивных методах, влияние отклонения формы эталонных деталей исключается применением т.н. инверсией входных величин (методом исключения погрешности по знаку). Биение измеряется два раза – до и после поворота эталонной детали на  $180^\circ$  и соответствующее репозиционирование измерительной головки (датчика).

В настоящем докладе, рассматриваются четыре нереверсивных метода оценки биения оси вращения, нашедшие применение в метрологической практике.

## **2. Методы измерения**

Как было указано выше, оценивание блуждающего биения, основывается на результатах измерения биения плоских и ротационных поверхностей эталонных деталей в радиальном и аксиальном направлении. Измеренные значения этого биения, в границах одного оборота, включают в себе первую гармоническую составляющую, связанную соответственно с эксцентриситетом и неперпендикулярностью соответствующей поверхности эталонных деталей относительно виртуальной оси вращения. На профилограммах, построенных по этим значениям, эта гармоническая составляющая выражается как эксцентриситет центра средней окружности измеренного круглого профиля относительно оси вращения, а блуждающее биение  $\Delta_i$  – как отклонение от средней окружности (рис. 1).

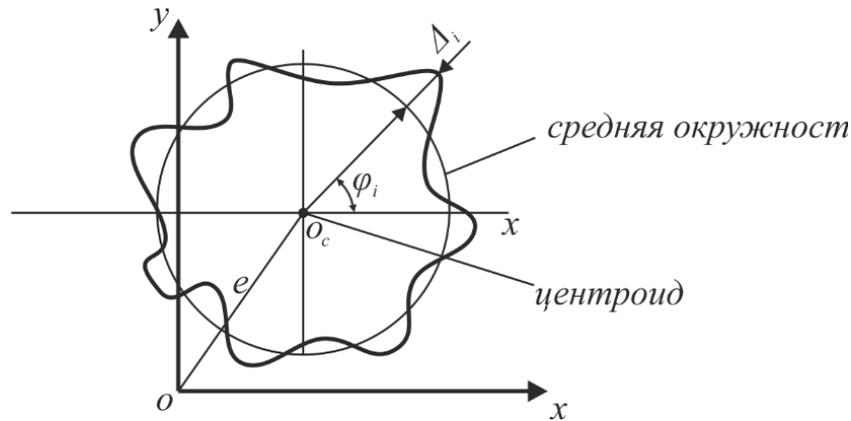


Рисунок 1. Представление блуждающего биения в виде профилограммы

### Метод 1

Метод 1 используется часто в метрологической практике для определения радиального  $\Delta_r$  и аксиального  $\Delta_a$  блуждающего биения. Но он позволяет также определение и углового блуждающего биения  $\Delta_y$ . Процедура включает измерение радиального и аксиального биения поверхности эталонной стеклянной полусферы, установленной на вращающемся столе исследуемого объекта (рис. 2<sup>а)</sup> <sup>б)</sup>) с помощью двух измерительных головок (ИГ<sub>1</sub> и ИГ<sub>2</sub>) и последующей обработки результатов  $A_{1i}$  и  $A_{2i}$  этих измерений, т.е. показаний измерительных головок при вращении стола на угол  $\varphi_i$ .

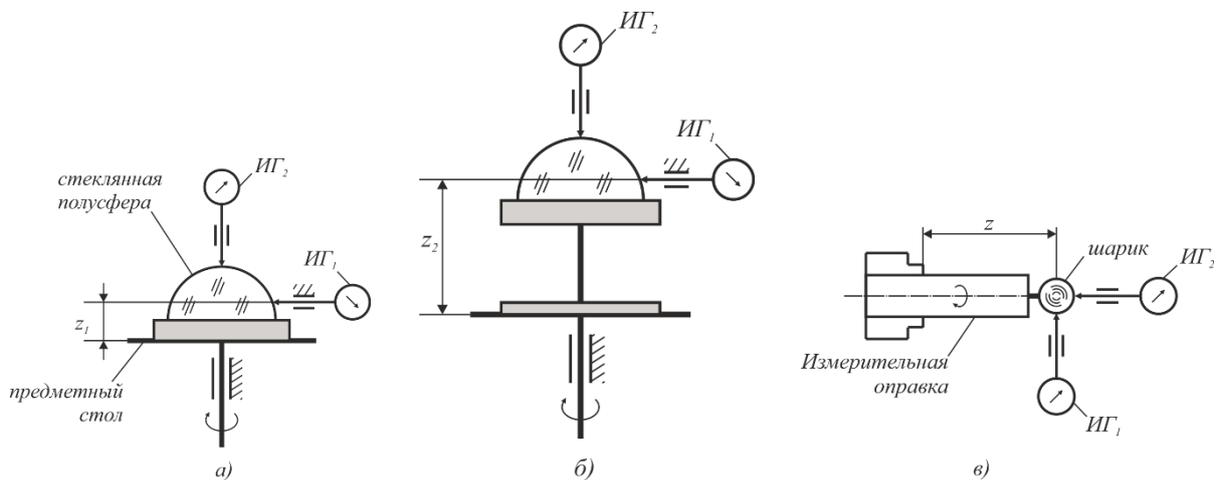


Рисунок 2. Схема измерения радиального аксиального и углового блуждающего биения (Метод 1)

Собственным отклонением формы эталонной полусферы можно пренебречь, и тогда радиальное биение  $\Delta_{r_i}$  проявляется как отклонение от круглости измеряемого профиля полусферы.

Аксиальное биение  $\Delta_a$  можно определить непосредственно по результатам измерения с ИГ<sub>2</sub>.

Аналогично радиальному биению и аксиальное блуждающее биение, при заданном угле вращения  $\varphi_i$  можно представить в виде профилограммы как отклонение от средней окружности.

При измерении радиального и аксиального блуждающего биения шпинделя металлорежущих станков используется оправка с шариком (рис. 2<sup>б)</sup>) [1].

Угловое блуждающее биение  $\Delta_y$ , определяется по результатам измерения радиального биения профиля полусферы на разной высоте  $z$  от предметного стола (рис. 2<sup>а) б)</sup>). Угол  $\alpha_i$ , между  $i$ -той мгновенной осью вращения и виртуальной базовой осью, определяется разностью между  $\Delta_{pi}$  двух находящихся на расстоянии  $\Delta z$  друг от друга сечений по формуле:

$$\alpha_i = \arctg \frac{\Delta_{piz1} - \Delta_{piz2}}{\Delta z} \quad (1)$$

Представление блуждающего радиального, аксиального и углового биения в виде профилограммы для оценки отклонения от окружности позволяет оценить как их текущие значения, как функции угла поворота  $\varphi_i$ , так и их максимальное рассеивание в виде размаха.

## Метод 2

Этим методом можно определить аксиальное и угловое блуждающее биение (рис. 3).

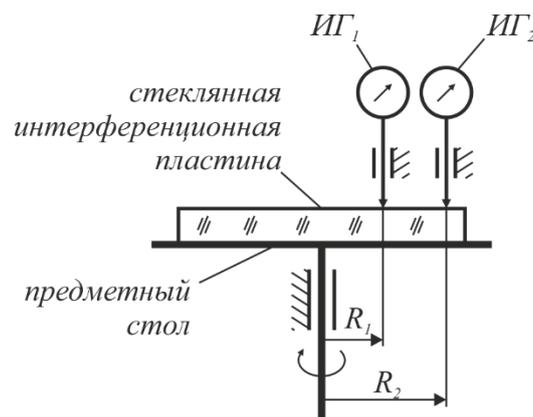


Рисунок 3. Схема измерения аксиального и углового блуждающего биения (Метод 2)

С помощью двух измерительных головок (ИГ<sub>1</sub> и ИГ<sub>2</sub>) измеряется торцевое биение установленной на предметном столе стеклянной интерференционной пластины по круговым дорожкам с радиусом  $R_1$  и  $R_2$ . При хорошем центрировании линия измерения с ИГ<sub>1</sub> приблизительно

совпадает с осью вращения, т.е. можно принять, что  $R_1 \approx 0$  и непосредственно по ее показаниям  $A_{1i}$  можно оценить аксиальное блуждающее биение. Торцевое биение, измеренное с ИГ<sub>2</sub>, включает в себе как аксиальное  $\Delta_a$  так и угловое  $\Delta_y$  блуждающее биение.

По значениям  $A_{2i}$  и  $A_{1i}$  строятся профилограммы по которым текущие значения  $\Delta_{a_{1i}}$  и  $\Delta_{a_{2i}}$  и их размах оцениваются как отклонения от средней окружности.

Текущий угол  $\alpha_i$ , между мгновенными осями вращения и виртуальной базовой осью, т.е. текущие значения углового блуждающего биения  $\Delta_{y_i}$ , определяются выражением

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \frac{\Delta_{a_{2i}} - \Delta_{a_{1i}}}{R_2} \quad (2)$$

### Метод 3

Этот метод используется обычно для определения аксиального блуждающего биения и отклонения от перпендикулярности предметного стола, относительно оси вращения (рис. 4).

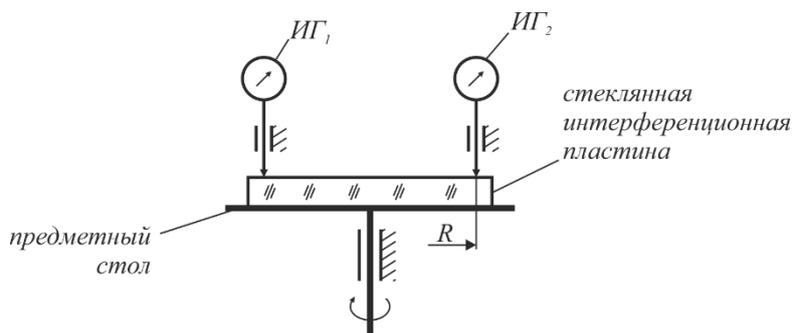


Рисунок 4. Схема измерения аксиального и углового блуждающего биения (Метод 3)

Измеряется одновременно торцевое биение, установленной на предметном столе стеклянной интерференционной пластины по круговой дорожке с радиусом  $R$ , с помощью двух измерительных головок (ИГ<sub>1</sub> и ИГ<sub>2</sub>) расположенных на 180°. Аксиальное и угловое блуждающее биение, определяются по показаниям  $A_{1i}$  и  $A_{2i}$  измерительных головок при вращении стола на угол  $\varphi_i$ .

Вычисляют полусумму  $\Delta A'_i$  и полуразницу  $\Delta A''_i$  этих показаний, отражающие соответственно аксиальное  $\Delta_{a_i}$  и угловое биение  $\Delta_{y_i}$ .

$$\Delta A'_i = \frac{A_{1i} + A_{2i}}{2} \quad (3)$$

$$\Delta A_i'' = \frac{A_{1i} - A_{2i}}{2} \quad (4)$$

Торцевое биение  $\Delta A_i''$  по радиусу  $R$ , выраженное в угловых единицах  $\alpha_i$ , определяется выражением.

$$\alpha_i = \arctg \frac{\Delta A_i''}{R} \quad (5)$$

По значениям  $\Delta A_i'$  и  $\Delta A_i''$  (соответственно  $\alpha_i$ ) строятся профилограммы, по которым текущие значения аксиального  $\Delta_{a_i}$  и углового  $\Delta_{y_i}$  блуждающего биения оцениваются как отклонения от их средних окружностей, аналогично методам 1 и 2.

#### Метод 4

Измерением по этому методу можно определить аксиальное и угловое блуждающее биение.

На предметном столе вращающегося модуля, устанавливается стеклянная интерференционная пластина с пренебрежимо малыми отклонениями от плоскости. С помощью трех и более ИГ расположенных симметрично по окружности с радиусом  $R$ , измеряется торцевое биение пластины при ее поворачивании на угол  $\varphi_i$  (рис. 5).

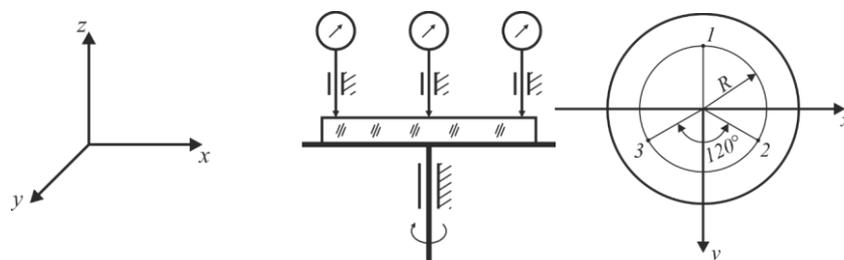


Рисунок 5. Схема измерения аксиального и углового блуждающего биения (Метод 4)

По показаниям измерительных головок, при заданном угле поворота стола  $\varphi_i$ , т.е. по координатам трех или более точек пластины в координатной системе XYZ, строится плоскость и вычисляется положение их центра по оси Z (координата  $z_i$ ) и положение нормального вектора этой плоскости относительно оси вращения. Ось вращения ориентирована по оси Z.

Колебание координаты  $z_i$  центра, выражает аксиальное блуждающее биение, а колебание положения нормального вектора – блуждающее угловое биение. И оба вида биения могут быть выражены их текущими значениями, относительно соответствующего центра или их размахом.

### 3. Экспериментальные исследования

Целью экспериментальных исследований, является оценивание и сравнение метрологических и эксплуатационных возможностей, рассматриваемых методов измерений, при одинаковых условиях измерения.

Определяются радиальное, аксиальное и угловое биение двух ротационных модулей со значительной разницей в точности вращения, обусловленной разницей подшипников – подшипники качения (при первом модуле) и аэростатические подшипники (при втором модуле).

Экспериментальная постановка позволяет реализовать каждый из описанных методов. В качестве эталонных деталей используются: стеклянная полусфера, с отклонением от круглости 0.05 мкм и стеклянная интерференционная пластина, с отклонением от плоскостности 0.07 мкм. В качестве измерительных головок, применяются линейные инкрементальные датчики HEIDENHAIN ST1288, связанные с многоканальным отсчитывающим прибором HEIDENHAIN GAGE-CHEK ND2108. При дискретности отсчета 1 мкм максимально допустимая погрешность  $MPE = \pm 1$  мкм. Для определения текущего угла поворота  $\varphi_i$ , служат встроенные в исследуемых ротационных модулях угловые инкрементальные датчики HEIDENHAIN ROD 486.

При конкретном эксперименте, используются пять датчиков (четыре расположенных на  $90^\circ$  по окружности с радиусом  $R = 50$  мм и один датчик в центре окружности). Показания, связанные с ними, отсчитываются одновременно через  $10^\circ$  за один оборот, т.е. в 36 точках измеряемого профиля эталонной детали. Далее, показания соответствующих датчиков, используются для реализации методов от 2 до 4. Таким образом, обеспечиваются одинаковые условия измерения.

При реализации метода 1 используются два датчика. Второй из них, измеряющий аксиальное биение, имеет плоский измерительный наконечник. Расстояние между измеряемыми сечениями, при оценке углового биения  $\Delta z = 300$  мм.

Для выделения систематической и случайной составляющей блуждающего биения, измерения проводятся при 10 последовательных оборотах, при скорости вращения 4 об/мин.

Результаты измерения представлены в табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1 – Результаты измерения Модуля 1

Метод	Модуль 1								
	Радиальное биение			Аксиальное биение			Угловое биение		
	$\Delta_p$	$u_c \Delta_p 1$	$u_c \Delta_p 2$	$\Delta_a$	$u_c \Delta_a 1$	$u_c \Delta_a 2$	$\Delta_\gamma$	$u_c \Delta_\gamma 1$	$u_c \Delta_\gamma 2$
1	59.5	3.4	0.25	9.1	0.76	0.25	560	34	7.2

2	-	-	-	9.3	0.73	0.25	592	20.6	7.2
3	-	-	-	9.1	0.73	0.18	518	19	3.6
4	-	-	-	9.1	0.76	0.15	518	19	2.4

**Замечания:**

1. Биение  $\Delta$  и соответствующие неопределенности  $u_c \Delta_1$  и  $u_c \Delta_2$  определены как средние арифметические из 10 наблюдений.
2. Значения радиального и аксиального биения даны в мкм, а углового биения в мкрад.

Таблица 2 – Результаты измерения Модуля 2

Метод	Модуль 2								
	Радиальное биение			Аксиальное биение			Угловое биение		
	$\Delta_p$	$u_c \Delta_{p1}$	$u_c \Delta_{p2}$	$\Delta_a$	$u_c \Delta_{a1}$	$u_c \Delta_{a2}$	$\Delta_\gamma$	$u_c \Delta_{\gamma1}$	$u_c \Delta_{\gamma2}$
1	1.7	0.095	0.35	0.8	0.13	0.25	48	1.28	7.2
2	-	-	-	0.7	0.12	0.25	28	0.64	7.2
3	-	-	-	0.7	0.03	0.18	22	1.9	3.6
4	-	-	-	0.6	0.03	0.15	22	1.9	2.4

**Замечания:**

1. Биение  $\Delta$  и соответствующие неопределенности  $u_c \Delta_1$  и  $u_c \Delta_2$  определены как средние арифметические из 10 наблюдений.
2. Значения радиального и аксиального биения даны в мкм, а углового биения в мкрад.

Оценка блуждающего биения как отклонение точек профилограммы относительно средней окружности позволяет, с одной стороны, исключить первую гармоническую составляющую, обусловленную эксцентриситетом и неперпендикулярностью эталонных деталей относительно оси вращения, а с другой стороны – представить блуждающее биение, как виртуальный выявленный круговой профиль и оценить его моментное значение и размах, через отклонения формы этого профиля, аналогично отклонению от круглости профиля реальной ротационной детали [6]. Тогда неопределенность результата измерения, можно оценить по значениям неопределенности положения двух экстремальных точек рассматриваемого профиля.

Неопределенность результата измерения блуждающего биения  $u_c \Delta$  содержит две основные составляющие –  $u_c \Delta_1$  и  $u_c \Delta_2$ .

$$u_c \Delta = \sqrt{u_c \Delta_1^2 + u_c \Delta_2^2}, \quad (6)$$

где  $u_c \Delta_1$  – неопределенность, связанная со свойствами исследуемого объекта, т.е. отражающая случайную составляющую блуждающего биения;

$u_c \Delta_2$  – неопределенность, связанная с процессом самого измерения, т.е. с реализацией виртуального выявленного профиля.

При одинаковых условиях измерения  $u_c \Delta_2$  зависит от точности измерительной системы, измерительной процедуры и алгоритма обработки первичной измерительной информации.

При  $MPE = \pm 1$  мкм оценивании типа В и принятом прямоугольном законе распределения, среднеквадратическая неопределенность, связанная с измерительной системой равна 0.58 мкм при однократном и 0.18 мкм при десятикратном измерении. Она входит в  $u_c \Delta_2$ , в зависимости от процедуры и алгоритма обработки первичной измерительной информации соответствующего метода (см. табл. 1 и табл. 2). Как видно из таблиц 1 и 2  $u_c \Delta_2$  наименьшая при методе 4.

Сравнение  $u_c \Delta_2$  при методах 1 и 2 с альтернативными реверсивными методами Дональдсона и Естлера [3, 4] показывает, что при пренебрежимо малых отклонениях формы эталонных деталей и равных других условиях, в результате двукратного измерения  $u_c \Delta_2$  при реверсивных методах на 30% меньше.

Первая составляющая неопределенности результата измерения  $u_c \Delta_1$  практически не зависит от метода измерения и логично является доминирующей при модуле 1.

Разница между оцененными значениями блуждающего биения при рассматриваемых четырех методах измерения находится в пределах неопределенности.

#### 4. Выводы

1. Точность измерения рассматриваемых методов, при других равных условиях определяется измерительной процедурой и алгоритмом обработки первичной измерительной информации. Эта точность самая высокая при методе 4.
2. Основными критериями, при выборе одного или другого из рассматриваемых методов, наряду с точностью, являются: наличие соответствующих эталонных деталей и число измерительных датчиков, программное обеспечение для обработки первичной измерительной информации, простота измерительной оснастки и удобство при работе. Для каждого конкретного случая этот выбор требует соответствующего анализа на базе экономической целесообразности.

## Литература

1. ISO 230-7:2015 Test code for machine tools -- Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation.
2. Salsbury, J. G., 2003, "Implementation of the Estler Face Motion Reversal Technique," J. Soc. Precis. Eng., 27(2), p. 189–194.
3. Donaldson, R. R., 1972, "A Simple Method for Separating Spindle Error From Test Ball Roundness Error," CIRP Ann., 21(1), p. 125–126.
4. Estler WT. Calibration and use of optical straightedges in the metrology of precision machines. Optical Engineering 1985;24 (3):372-9.
5. Grejda, R. D., Marsh, E. R., and Vallance, R. R., 2005, "Techniques for Calibrating Spindle With Nanometer Error Motion," ASPE Journal of Precision Engineering, 29(1), p. 113–123.
6. Радев Х.К., Богев В.Й., Василев В.А., 2011, Неопределенность оценок отклонений формы геометрических элементов, Системи обробки інформації, 1(91), стр. 62-66