
Министерство промышленности и торговли России
Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
НИИ «Лот» ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
Международная общественная организация «Академия навигации и
управления движением»
Межотраслевой совет по прикладной метрологии и приборостроению при
Российском союзе промышленников и предпринимателей (МСМП)
ООО «Петербургский сертификационный центр»

Шестая Международная
научно-техническая конференция

**Измерения и испытания
в судостроении и смежных отраслях**

СУДОМЕТРИКА-2016

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Санкт-Петербург
11 – 13 октября 2016 г.

УДК 006.91

Материалы Шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2016)» / ред. В. А. Грановский. – СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016.–266 с.

В сборнике приведены материалы докладов и сообщений, посвященные методам и средствам измерений, испытаний и метрологического обеспечения, а также теории измерений, применительно к сфере создания изделий судостроения.

Под общей редакцией профессора, члена Академии навигации и управления движением, члена Метрологической академии, заслуженного метролога РФ В. А. Грановского.

© АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»: 2016

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	7
ПРАКТИКА МИКРОМАСШТАБНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССОБМЕНА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОДА-ВОЗДУХ С. С. Зенченко.....	8
ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ СУДОВ И ЕГО ОЦЕНКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ОБЛИКА А. С. Калганов, С. С. Зенченко, И. Е. Карпова, А. Ю. Андреев	13
ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ПРЕЦИЗИОННОМ УГЛОЗАДАЮЩЕМ ПОВОРОТНОМ СТОЛЕ А. В. Полушкин, Н. А. Калдымов, И. В. Слистин, Д. Г. Борчанинов, С. Ф. Нахов, А. А. Полушкин, А. А. Янковский	16
ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТОПЛИВ И МАСЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ Г. В. Шувалов	28
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ Г. В. Шувалов	33
ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СУДОСТРОЕНИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ А. В. Бурдуков	39
РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТОЧНОСТИ Ю. В. Савельев, В. М. Гнидюк, В. М. Савельева, М. Н. Абашин.....	50
РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЬБОВЫХ КАЛИБРОВ Э. Ф. Аскарлова, Е. Б. Брюховецкая, Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалев, Е. А. Михеев	59
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С. Р. Карпиков	63
УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ПО ПАРАМЕТРУ ЭМК И. С. Хасиев	70
ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ С. С. Чистякова.....	73

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАБОТУ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С «ОБРАЩЕННЫМ ДАТЧИКОМ СИЛЫ» Е. Э. Аман, А. И. Скалон	76
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТЕРМОСТОЙКИХ ЭМАЛЕЙ ДЛЯ ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В СУДОСТРОЕНИИ С. Л. Брилин, И. Е. Карпова	83
МЕГАОММЕТР ЦИФРОВОЙ ПЕРЕНОСНОЙ ЦМ1255 И. Н. Попов	85
ПРИБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОСНОЙ ЦК 1254 И. А. Глазунов, В. В. Островерхов, И. В. Корольков	91
ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ПРИБОРОВ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ Л. С. Заславский, А. И. Лептух, А. А. Фридлянд, В. Г. Суринт, В. Ю. Рыжик, А. А. Слабнов.....	93
РЕГИСТРАТОР-КОНТРОЛЛЕР ВИДЕОГРАФИЧЕСКИЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ПРИБОРОВ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ Л. С. Заславский, А. И. Лептух, В. Г. Суринт, В. Ю. Рыжик, А. А. Слабнов, А. В. Саввин.....	95
СИНХРОНОСКОП Э1550 С. А. Шабанов.....	97
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ	99
МАГНИТО-ЭКРАНИРОВАННАЯ КОМНАТА КАК ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЕЕ СТРОИТЕЛЬСТВА В. В. Привалов, И. С. Хасиев, В. И. Шеремет	100
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ БОРТОВЫХ ГРАВИМЕТРОВ А. А. Краснов, Т. Н. Сирая, А. В. Соколов	104
ПРАКТИКА АТТЕСТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВИДЕТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА А. В. Ильин, В. Ю. Филин, М. А. Гусев, А. Ю. Маркадеева, М. Е. Юрков.....	111
ИСПЫТАНИЯ В ЦЕЛЯХ УТВЕРЖДЕНИЯ ТИПА КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ОТ $5 \cdot 10^{-9}$ ДО $1 \cdot 10^{-6}$ М В. Л. Федорин, З. В. Фомкина	119
ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ АТТЕСТАЦИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИМИТАТОРОВ ДВИЖЕНИЯ К. С. Гороховский, Н. Л. Яворовская, О. А. Яковенко	125

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОГО МОРСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ А. П. Смирнов, К. К. Басалаев	127
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННО- МОДЕЛИРУЮЩЕГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ АКВАТОРИИ В. А. Грановский, В. В. Беляева, А. В. Шафранюк, В. В. Прокопович	131
МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ.....	139
НОРМАТИВНЫЕ СЛОЖНОСТИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН А. А. Агдавлетова, И. В. Иванова.....	140
МЕСТО КАЛИБРОВКИ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ А. Г. Чуновкина, И. А. Харитонов.....	145
КАЛИБРОВКА КАК ФОРМА ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ А. С. Кривов.....	149
ОСОБЕННОСТИ АТТЕСТАЦИИ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ В СЛУЧАЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ В. В. Беляева, М. Д. Кудрявцев, Т. Н. Сирая, Н. Л. Яворовская.....	151
ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БУЁВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ Д. Г. Грязин, О. О. Белова	158
УСТАНОВКИ ФГУП «ВНИИФТРИ» ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ГРАДУИРОВКИ ГИДРОФОНОВ А. И. Щелкунов	162
ПОВЕРОЧНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ЭКРАНИРОВАННОЙ МЕРЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ Д. Д. Гидаспов, В. В. Привалов, И. С. Хасиев.....	167
ЭТАЛОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПРИЁМНИКОВ ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ Г. С. Некрич, А. Н. Матвеев	170
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ Ю. А. Ломовацкий.....	174
ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА GIGATESS А. Б. Талуц	178

КАЛИБРОВКА ПРИЕМНИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ПОДВОДНОГО ШУМА А. Е. Исаев, И. В. Черников, А. С. Николаенко	179
ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В ПОВЕРОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ М. В. Бородько.....	187
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ А. А. Зуйков	198
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ АТОМНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ И МОРСКОЙ СРЕДЫ Н. Л. Кучин, А. И. Лайкин, Ю. В. Михеев.....	205
ИЗМЕРЕНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ГИДРОФОНОВ НА ЛЧМ СИГНАЛАХ Н. Г. Щерблюк.....	214
ГРАДУИРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРИЁМНИКОВ ПО ПОЛЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОВОГО СИГНАЛА В ЛАБОРАТОРНОМ БАССЕЙНЕ А. Е. Исаев, И. В. Черников	219
ОЦЕНИВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ А. И. Скалон.....	225
ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ.....	231
УМЕНЬШЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТОЧНОСТЕЙ ЭТАЛОНА И ПОВЕРЯЕМОГО СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ С СУЩЕСТВЕННОЙ СЛУЧАЙНОЙ И ПОСТОЯННОЙ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ В. А. Грановский, М. Д. Кудрявцев.....	232
КАЧЕСТВО КАЛИБРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ: РЕГРЕССИОННЫЕ И КОНФЛЮЕНТНЫЕ МЕТОДЫ М. Д. Кудрявцев, Т. Н. Сирая.....	242
АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО ВОЗМОЖНЫХ ТОЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ МЕЖДУ ОСЯМИ УЗКОНАПРАВЛЕННЫХ ЛУЧЕЙ И ОБОСНОВАНИЕ СООТВЕТСТВУЮЩЕГО КООРДИНАТНОГО МЕТОДА К. С. Гороховский, М. Д. Кудрявцев.....	252
ВОПРОСЫ АДЕКВАТНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ Т. Н. Сирая	261

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

ПРАКТИКА МИКРОМАСШТАБНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССОБМЕНА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ВОДА-ВОЗДУХ

С. С. Зенченко¹

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, РФ,
тел. 8 (812) 415-46-14, 8-911-783-92-95, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

Аннотация

Ключевые слова: температура поверхности, поверхностная пленка воды, ИК-аппаратура, тепломассообмен, микромасштабный процесс, граница раздела вода-воздух.

Одним из перспективных методов исследований поля температуры морской поверхности является метод с использованием дистанционной ИК-аппаратуры. В работе акцентировано внимание на поверхностной пленке воды, влияющей на формирование сигнала ИК-техники и связанной с процессом тепломассообмена на границе раздела вода-воздух. Автором дано обоснование методов микромасштабных исследований этой субстанции в строго контролируемых лабораторных условиях. Методы основаны на создании контролируемых возмущений, обеспечивающих изменение баланса сил плавучести и поверхностного натяжения, под действием которых существует эта субстанция. При этом выбранный уровень возмущений обеспечивает возможность многократного повторения эксперимента. К указанным возмущениям отнесены акустическое барботирование, обдув поверхности, создание гравитационно-капиллярного волнения. Приведены примеры использования изложенной методики при различных условиях тепломассообмена на границе раздела вода - воздух.

Введение

Взволнованная морская поверхность является чрезвычайно важным и информативным полем, которое исследуют в интересах изучения климата, решения экологических задач, решения задач приборостроения, а также создания гражданской морской техники. Одной из важных характеристик взволнованной поверхности моря является её температура. Многочисленные океанологические и гидрофизические исследования позволили установить взаимосвязь глобальных изменений температуры (дневных, сезонных, годовых) с изменением таких составляющих тепломассообмена на границе раздела вода-воздух (рисунок 1), как затраты тепла на испарение ($Q_{исп}$), турбулентный обмен с атмосферой ($Q_{т.о.}$), длинноволновое излучение ($Q_{дл.из.}$).

Однако в практическом отношении существенную роль и значение имеют температурные изменения за более короткие промежутки времени, которые зависят от микромасштабных процессов на поверхности моря. В этой связи установлено, что на границе раздела вода - воздух существует определенная субстанция - скин-слой или поверхностная пленка воды (ППВ), называемая "холодной" или "теплой" в зависимости от её состояния по отношению к нижележащим слоям воды с квазиизотермическим распределением температуры (Рис.1).

При этом условное состояние ППВ связывалось с определенным соотношением температуры воды ($T_в$) и атмосферы ($T_а$) при классическом распределении температуры в них. Для "холодной" ППВ рассматривалось соотношение $T_в > T_а$. Для "теплой" ППВ принималось соотношение $T_в < T_а$. Ограниченные возможности исследований ППВ в натуральных условиях из-за применения методов контактного зондирования профилей температуры до глубин в несколько миллиметров от границы раздела двух сред в условиях волнения, а также большое число факторов, влияющих на динамику ППВ, обусловили необходимость изучения ППВ в лабораторных условиях. Анализ многочисленных лабораторных исследований [1 - 5] показал, что методики этих исследований строились применительно к изучению профиля и распределения температуры в тонких слоях на границе раздела вода - воздух, механизмов образования ППВ на основании многоточечных измерений. Кроме того, основное внимание уделялось холодной ППВ, поскольку из-за отдачи тепла океаном в атмосферу она рассматривалась как типичная. Однако не могут быть исключены из рассмотрения противоположные ситуации, когда $T_в < T_а$.

¹ Кандидат технических наук, начальник сектора.

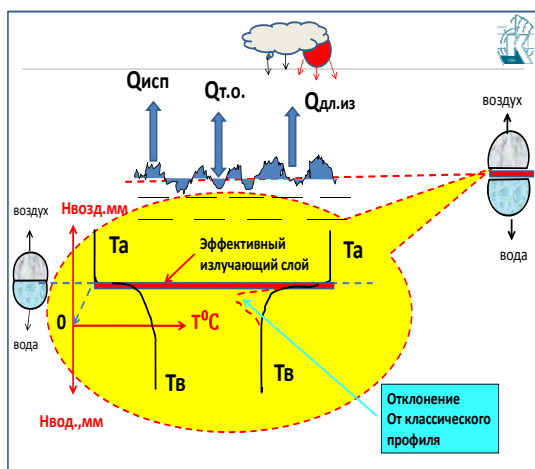


Рисунок 1- Формирование ТПВ

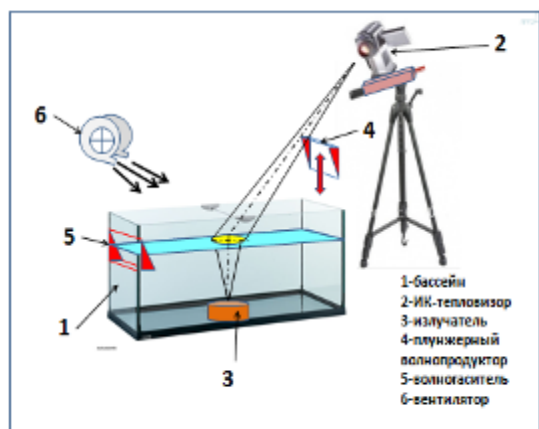


Рисунок 2 - Экспериментальные установки и устройства, используемые при исследовании

К примеру, по материалам [6], такое соотношение между температурой воды и воздуха наблюдается в большинстве случаев, как в полунатурных условиях, так и в Черном и Баренцевом морях. Указанные ситуации могут носить локальный характер в силу различного рода возмущений морской поверхности. На сегодняшний момент установлены ставшие известными предельные параметры ТПВ: толщина до (3-5) мм, перепад температуры до $(1-1,5)^\circ\text{C}$, градиент температуры до 1000°C/м . Кроме того, предложен механизм формирования ТПВ за счет охлаждения поверхности под действием испарения, последующего разрушения под действием сил тяжести из-за неустойчивости тонких охлажденных слоев. В целом, этот эффект определен как процесс термо-капиллярной конвекции. Дальнейшим шагом в исследовании ТПВ должно быть изучение пространственно-временной изменчивости ТПВ во всех возможных условиях теплообмена на границе раздела вода - воздух. Сложность решения такой задачи обусловлена необходимостью проведения тонких экспериментов с хорошо подготовленной методикой. ФГУП «Крыловский государственный центр» имеет большой опыт гидрофизических исследований в лабораторных и натурных условиях с применением дистанционной ИК-аппаратуры. Обоснованию методического подхода к такого рода микромасштабным исследованиям посвящена настоящая работа.

Анализ проблемы

Вполне очевидно, что в пользу дистанционного метода говорит то обстоятельство, что в отличие от контактных измерений, при которых пространственное разрешение чувствительного элемента терморпары составляет 0,1 мм, дистанционный метод позволяет контролировать тепловое излучение в пределах толщины эффективного излучающего слоя, составляющей, например, 20 мкм для спектрального диапазона (8 - 12) мкм. При этом, находясь в пределах ТПВ, тонкие эффективные излучающие слои отражают динамику процессов в ТПВ и полностью ею определяются. Кроме того использование в аппаратуре тепловизионных матричных приемников обеспечивает получение развертки пространственной картины в пределах всей матрицы, а выбор размеров оптики и удаление от поверхности дают возможность регистрации тепловой карты в пределах всей контролируемой площади водной поверхности. Одновременно многочастотная съемка обеспечивает возможность контроля быстрых процессов, соизмеримых по скорости с частотой съемки тепловой карты. Учитывая, что исследуемые процессы относятся к категории микромасштабных, в качестве одного из исследовательских подходов можно рассматривать искусственное влияние на баланс сил тяжести и поверхностного натяжения. Оно может быть обеспечено путем создания дополнительных сил, вызывающих появление горизонтальных течений на поверхности за счет волнения или барботирования поверхности изнутри жидкости механическим локальным возмущением, а также нагрева или охлаждения. Поэтому проведение тонких измерений для изучения собственной пространственно-временной изменчивости поля температуры предполагало использование дозированного, ограниченного по масштабам, времени и интенсивности регулируемого воздействия на ТПВ, чтобы иметь возможность наблюдать отклик этой системы на возмущение. Одновременно масштабы горизонтальных и вертикальных возмущений должны обеспечивать ограниченное по времени

воздействие, максимальную повторяемость экспериментов и не нарушать вертикальной структуры на границе раздела вода - воздух и в масштабе объема всей водной среды.

Кроме вышеназванного, возможен еще один вариант исследований. Подход к нему опирается на учет внешних условий проведения экспериментов. Контролируемые и постоянные во времени внешние условия позволяют при исследовании от эксперимента к эксперименту добиваться контролируемого воздействия на такие составляющих теплообмена, как турбулентный обмен с атмосферой и испарение, а длинноволновое излучение в условиях лабораторного эксперимента можно считать неизменной величиной. При такой постановке целесообразно использование ветрового обдува поверхности, обеспечивающего повышение скорости отвода паров и увеличения затрат на испарение, а также, одновременно, создание дополнительного перемешивания в приводном слое воздуха. При этом можно считать оправданным выбор диапазона скоростей ветра (0,3 - 0,5) м/с, который обеспечивает создание гравитационно-капиллярных волн, свойства которых связаны с силами поверхностного натяжения.

Воплощения намеченной концепции исследований показаны на ряде следующих примеров. Исследования проводились в бассейне с размерами 150x370x400 мм (рисунок 2). Над поверхностью размещался вентилятор, обеспечивающий обдув поверхности и её охлаждение за счет изменения испарения с поверхности. Сам бассейн был термостатирован, для чего пенопластом были закрыты все боковые стороны и дно, чтобы исключить дополнительные потери тепла через элементы конструкции бассейна. В бассейне устанавливался клинообразный механический волнопродуктор и волногаситель, обеспечивающие генерацию волн с амплитудой (2 - 3) мм и длиной (10 - 120) мм. На дно бассейна устанавливался акустический излучатель, обеспечивающий особый режим возмущения поверхности путем её барботирования. При выбранной мощности излучателя 20 Вт, диаметре мембраны излучателя 6 см, расчет по известным формулам дает предполагаемый подъем воды 1 мм вследствие звукового давления в зоне максимума лепестка диаграммы направленности излучателя. Предполагаемые оценки максимальных волновых возмущений от акустического поля на поверхности, составляющие не более 0,15 мкм, в расчет не принимались в силу ограниченного во времени акустического воздействия, недостаточного для развития такого волнения. Наблюдение поверхности производилось с помощью тепловизора в спектральном диапазоне (8 - 14) мкм. Выбранные параметры акустического излучателя обеспечивали подъем нижних подповерхностных слоев на 1 мм, что фиксировалось по тепловизору, а знак и уровень контраста позволял делать выводы о состоянии ППВ. Для захвата полной площади поверхности в тепловизоре применялся объектив с фокусным расстоянием 50 мм, удаленный на 1,5 м от поверхности; измерения осуществлялись в надир, чтобы исключить возможное влияние "подсветки" окружающего фона. Дополнительно, в максимальной близости к поверхности бассейна производился контроль влажности.

Ниже представлены результаты реализации обоснованного выше подхода к исследованию ППВ. При условиях $T_b > T_a$ (предполагаемое образование холодной ППВ) начальное превышение температуры воды над температурой воздуха составляло 6,6 °С, T_a и T_b составляли 28 °С и 34,6 °С, соответственно. Последние величины контролировались в лабораторных условиях на удалении (5 - 10) см в обе стороны от границы раздела. На рисунке 3 приведены тепловизионные фрагменты изменений температуры поверхности воды, по которым можно наблюдать формирование и последующие структурные изменения ППВ в пределах площади поверхности бассейна.

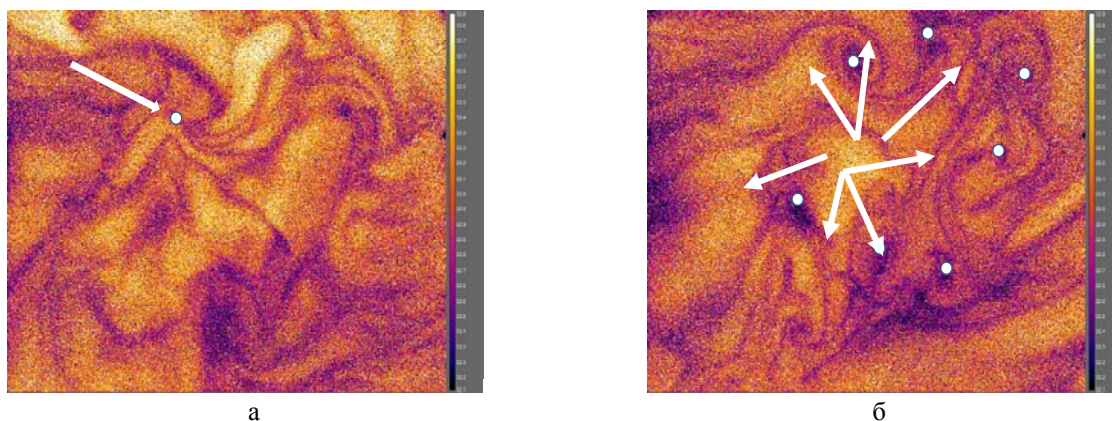


Рисунок 3 - Тепловизионные фрагменты состояния «холодной» ППВ с обозначением динамики вихревых областей в начальный период (а) и в развитии (б)

При этом обеспечен наглядный контроль вихревых элементов тепловых процессов, их видоизменения и перерождения. Хорошо видны различные по размерам, состоянию тепловые области. Картина распределения температуры позволяет отслеживать эти видоизменения, измерять размеры, температурные различия, динамику во времени и пространстве.

Кроме того, одновременная программная обработка в пределах заданных контрольных линий дает возможность оценить свойства зон нарушений ППВ и линий оттока неустойчивой тяжелой воды внутрь жидкости. Полученные теплограммы позволяют в дальнейшем оценить уровни и критерии устойчивости, не только по осредненным данным, но и для конкретных областей и зон (рисунок 4).

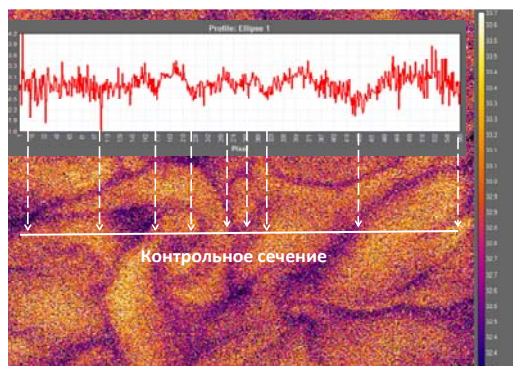


Рисунок 4-Теплограмма зон ППВ и линий

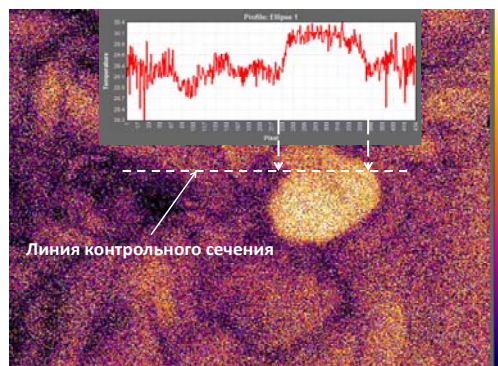


Рисунок 5 - Теплограмма тестового сигнала и оттока жидкости индикации при акустическом барботировании

На рисунке 5 представлены результаты тепловизионных измерений с использованием акустического барботирования поверхности. Сигнал по амплитуде и масштабам его индикации выполнял роль калибровочного для оценки состояния ППВ, поскольку позволял оценить время, размеры температурной области, время релаксации, а также обеспечивал возможность многократного применения акустического барботирования.

В случае $T_b < T_a$ (рисунок 6) создавалась разность температур в пределах (3 – 5) °С. Абсолютные значения температуры T_a составляли значения от 24 °С до 25 °С. В отличие от состояния для холодной ППВ, распределение температуры по всей площади бассейна почти равномерное (максимальная разница температур по всей площади в пределах $\pm 0,2$ °С). Это подтвердило предположение о возможном более устойчивом состоянии верхних слоев жидкости у поверхности, однако предполагаемое классическое распределение температуры в ППВ не выполнялось, поскольку в эффективном излучающем слое температура во всех случаях измерений оказывалась ниже температуры квазиизотермической глубины. Такое отклонение распределения температуры от классического распределения показано на рисунке 1. Данные теплограмм позволяют исследовать связь этого фактора с возможностями дополнительного испарения с поверхности. В таком случае, принадлежность такого состояния ППВ к "теплой", оказывается не совсем корректной.

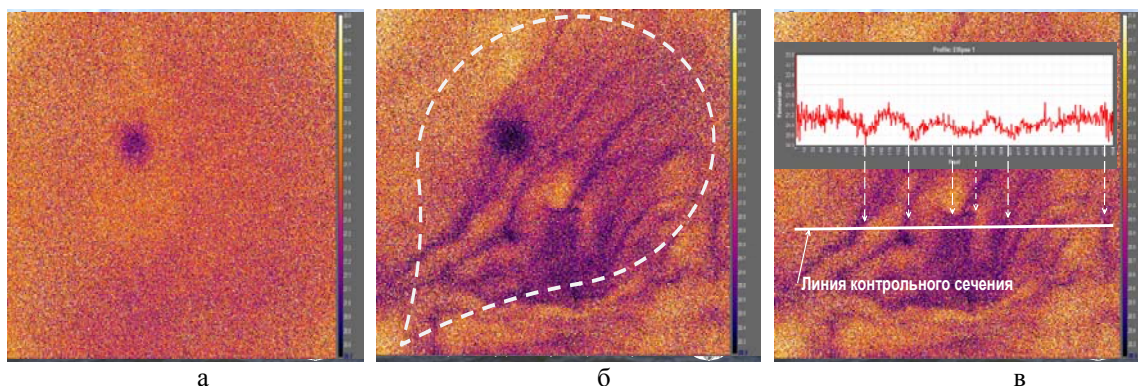


Рисунок 6 - Теплограммы водной поверхности при $T_b < T_a$ в пределах диаграммы направленности ветрового потока при обдуве (б), при определении параметров аномальных зон с использованием линии контрольного сечения (в)

В соответствии с условиями $T_b < T_a$ величины амплитуд температуры ППВ оказываются существенно меньшими, чем таковые для холодной ППВ.

Применение обдува обеспечило создание условий для исследования влияния испарения на ППВ и возможность сравнения данных для холодной и теплой ППВ. На рисунке 6 показаны моменты проявления такого обдува в пределах диаграммы направленности ветрового потока вентилятора. Эти данные позволяют отследить картину образования аномальных областей и измерить их параметры, получить данные об изменении температуры в любой из зон и измерить время реакции системы на охлаждение и время релаксации после прекращения действия искусственного возмущения.

Создание гравитационно-капиллярного волнения позволяет сопоставить уровень изменения сигнала тепловизора, модулированного параметрами волнения, с предполагаемым изменением состояния ППВ, определенным по предварительному калибровочному акустическому подъему воды. Такое сопоставление дает информацию о поведении ППВ при определенном уровне волнения.

Таким образом, представленные результаты исследований позволяют положительно оценить выбранные методики, экспериментальные установки и средства измерений для регистрации и оценки характеристик ППВ, а также расширения имеющихся представлений о микромасштабных процессах в ППВ.

Литература

1. Гинзбург, А. И., Зацепин, А. Г., Федоров, К. Н. Токая структура термического пограничного слоя в воде у поверхности раздела вода-воздух // Изв.АН СССР. ФАО, 1977, т. 13, № 12.
2. Гинзбург, А. И., Федоров, К. Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции // Изв.АН СССР. ФАО, 1978, т. 14, № 1.
3. Анисимова, Е. П. и др. К вопросу о теплообмене в тонком пограничном слое вода-воздух // Изв.АН СССР. ФАО, 1983, т. 19, № 9.
4. Бунэ, А. В., Гинзбург, А. И., Полежаев, В. И., Федоров, К. Н. Численное и лабораторное моделирование развития конвекции в охлаждающем с поверхности слое воды // Изв.АН СССР, ФАО, 1985, т. 21, № 9.
5. Мизёв, А. И. Экспериментальное исследование термокапиллярной конвекции, индуцированной локальной температурной неоднородностью вблизи поверхности жидкости. 2.Источник тепла, индуцированный излучением // Прикладная механика и техническая физика, 2004, т. 45, № 5.
6. Гончаров, В. К., Зенченко, С. С., Иванов, Г. Н., Мельников, Г. С., Камолов, Ю. З., Поварков, В. И. Исследование температурных перепадов в поверхностном слое открытого опытового бассейна методом пузырькового апвеллинга и принудительного обдува поверхности. В кн. «Оптика моря», М.: Наука, 1983. - С. 204-211.

ТЕПЛОВОЕ ПОЛЕ СУДОВ И ЕГО ОЦЕНКА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ОБЛИКА

А. С. Калганов¹, С. С. Зенченко², И. Е. Карпова³, А. Ю. Андреев⁴
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, РФ,
тел. 8 (812) 415-46-14, 8-911-783-92-95, e-mail: krylov@krylov.spb.ru

Аннотация

Ключевые слова: тепловое поле, температура, дистанция обнаружения судов, экология.

Построение новых экологически чистых судов является перспективной задачей гражданского судостроения. Для решения такой задачи необходимы выбор и оценка основных параметров. Одним из таких параметров является тепловое поле судна. В настоящей работе представлены обоснования и результаты исследований тепловых полей судов с прямыми вертикальными бортами типа автовозов, полученных с помощью тепловизора марки Fluke.

Одной из перспективных задач гражданского судостроения является построение новых экологически чистых судов. Для решения такой задачи необходимы выбор и оценка основных параметров. По логике на первом плане может стоять тепловое поле судна, которое формируется из полей локальных тепловых источников, расположенных внутри судна, а также излучения теплового факела при сгорании углеводородного топлива. Кроме того, факел является источником выброса остатков несгоревшего топлива в атмосферу и её загрязнения. При этом оценка собственных внутренних локальных полей источников, определенных по их паспортным техническим допустимым характеристикам не позволяет произвести оценку их влияния на внешнее тепловое поле из-за большого числа дополнительных параметров внешнего фона, особенно в процессе эксплуатации. Поэтому одним из возможных решений является прямой замер внешнего поля с помощью ИК-тепловизоров. Большой опыт эксплуатации ИК-радиометрической и тепловизионной техники [1, 2] подсказывает, что в этом случае необходимо учитывать углы наблюдения – параллельно водной поверхности. В зависимости от характеристик оптики и дальности до корпуса судна возможны искажения, связанные с попаданием в кадр элементов водной акватории или участков небосвода. Не последнюю роль играет конфигурация поверхностей судна или обводы корпуса. Не исключено отражение от элементов судовых конструкций солнечного блика или переотражения от выступающих соседних элементов. Кроме того, получение достоверных параметров возможно при стационарном размещении тепловизионной техники и движении судов на одном удалении от прибора, по одной траектории, в одних условиях и с одной скоростью.

В настоящей работе представлены обоснования и результаты исследований, в которых упомянутые выше условия получения достоверных данных оказались реальностью. Для этого был использован тепловизор марки Fluke, имеющий функцию "центральной области" и обеспечивающую создание очень малой площади разрешения, ограниченной откликом одного или 2-х центральных пикселей матрицы, контролирующей на удалении фактически точку поверхности измерения. Кроме того такая область более устойчива к помехам, связанным с краями матрицы и меньшим влиянием отраженного излучения фона. Обеспечение устойчивой конфигурации обводов судна производилось с учетом выбора и измерений на судах с прямыми вертикальными бортами типа автовозов.

Желательная маневренность судна оказалась реализуемой при использовании уникальной возможности движения судов через судопропускной канал комплекса защитных сооружений С.-Петербурга. На рисунке 1 представлена фотография комплекса с высоты 300 м. Фарватер прохода располагался строго посередине канала, дальность до траектории движения составляла 100 м. Движение судов осуществлялось с постоянной скоростью.

¹ Инженер.

² Кандидат технических наук, начальник сектора.

³ Ведущий инженер.

⁴ Начальник сектора.



Рисунок 1 – Судопропускной канал комплекса защитных сооружений на Финском заливе

На рисунках 2, 3 представлены фотография автовоза «Auto Baltic» и его тепловой портрет (8 ÷ 14 мкм).



Рисунок 2 – Автовоз «Auto Baltic»
(оптический диапазон)

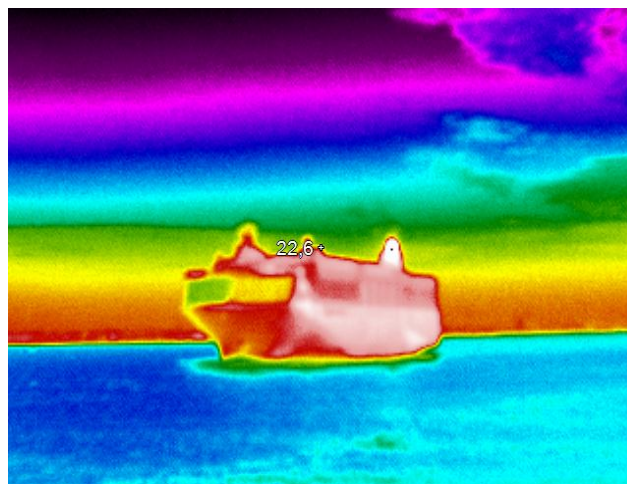


Рисунок 3 – Автовоз «Auto Baltic»
(ИК- диапазон)

На рисунках 4, 5 представлены такие же портреты судна «Baltic Merchant». По результатам анализа этих данных в Таблице 1 приведены основные типы излучающих элементов и оценка их вклада в общее излучение судна. Кроме того, даны оценки характеристик факела и близко расположенных конструктивных элементов. По измеренным параметрам с использованием известных формул [3,4] произведена оценка контрастной облученности зрчка ИК-аппаратуры.



Рисунок 4 – Судно «Baltic Merchant»
 (оптический диапазон)



Рисунок 5 – Судно «Baltic Merchant»
 (ИК- диапазон)

Таблица 1. Облучённость ИК-аппаратуры ΔE

№ п/п	Наименование	ΔE , Вт/см ²	$\Delta E_i/\Delta E_c$
1	Факел: а) сажистые частицы б) дымовые газы	$1,9 \cdot 10^{-8}$	10 %: а) 85 % б) 15 %
2	Стенка машинного отделения	$5,1 \cdot 10^{-8}$	25 %
3	Корпус (борт) без машинного отделения	$1,04 \cdot 10^{-7}$	40 %
4	Кожух дымовой трубы: а) верхняя часть кожуха б) нижняя часть кожуха	$2 \cdot 10^{-8}$	25 %: а) 80 % б) 20 %
5	Всё судно	$1,9 \cdot 10^{-7}$	100 %

В результате расчетных оценок по данным измерений сделаны выводы о вкладе таких излучающих элементов, как газовый факел, машинное отделение, кожух дымовой трубы и т.п. По измеренным тепловым портретам определены параметры факела, сделаны оценки вклада сажистых частиц в загрязнение атмосферы. Сравнение показателей и для других судов выбранного типа выявило такой же идентичный вклад упомянутых выше составляющих. Полученные данные легли в основу разработки методов измерения при сложных обводах корпуса судов и накопления базы данных для дальнейшей стандартизации и формирования облика экологически чистых судов.

Литература

1. Зенченко, С. С., Поварков, В. И., Самков, В. М. Угловой и многоспектральный метод измерения характеристик морской поверхности в оптическом диапазоне спектра, X Пленум "ОПТИКА ОКЕАНА" АН СССР, тезисы докладов. – Ростов-на Дону, Ленинград: 1988.
2. Зенченко, С. С., Самков В. М. Особенности использования дистанционной аппаратуры при измерении температуры поверхности океана, Всесоюзная конференция "Проблемы метрологии гидрофизических измерений", тезисы докладов. – М.: 1990.
3. Джемисон, Дж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения / Дж. Э. Джемисон [и др.]. – М.: Советское радио, 1966.
4. Блох, А. Г. Тепловое излучение в котельных установках. – Л.: Энергия, 1967.

**ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ КОМПЕНСАЦИИ
СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ПРЕЦИЗИОННОМ УГЛОЗАДАЮЩЕМ
ПОВОРОТНОМ СТОЛЕ**

А. В. Полушкин¹, Н. А. Калдымов², И. В. Слистин³, Д. Г. Борчанинов⁴, С. Ф. Нахов⁵,

Филиал ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина – «ПО «Корпус», г. Саратов, РФ,

тел.: +7 (8452) 69-10-99, e-mail: kb231@korpus64.ru

А. А. Полушкин⁶,

МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, РФ

А. А. Янковский⁷

ФГУП «ВНИИМ им Д.И.Менделеева», Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Ключевые слова: калибровка, Фурье анализ, измерение угла, угловой энкодер

Работа посвящена выбору оптимального метода алгоритмической компенсации систематической погрешности прецизионного углозадающего поворотного стола. Для этого составлена математическая модель погрешности цифрового поворотного стола СПЦ-383, отдельно рассмотрены погрешности оптического датчика угла, механической части стола, погрешности электроники, а также инструментальные погрешности средств измерения. При анализе рассмотрен состав погрешностей датчика угла, полученных при его производстве, а также после установки в поворотный стол. Также проанализированы конструктивные особенности механической части стола, обеспечивающие стабильность точностных характеристик. Проведен не только качественный, но и количественный анализ погрешностей поворотного стола и предложены методы их компенсации. Теоретические проработки подтверждены экспериментальными данными, полученными при испытаниях ряда поворотных столов СПЦ-383, имеющихся на предприятии.

При испытаниях навигационных приборов и их элементов необходимо задание и измерение большого количества угловых положений. Учитывая высокие требования к точности современных навигационных систем, контрольно-испытательная аппаратура для их проверок должна иметь технические характеристики на уровне эталонных средств измерения. Обеспечение точности задания и контроля угловых положений, с точностью десятых долей угловой секунды накладывает ряд серьезных ограничений на условия проведения испытаний и на используемое оборудование. Помещение для проверок должно отвечать требованиям ГОСТ 8.050-73, а аппаратура должна представлять собой метрологически сертифицированный (поверенный или калиброванный) многофункциональный современный измерительно-вычислительный комплекс, обеспечивающий контроль параметров в автоматическом режиме.

В ФГУП «НПЦАП им. академика Н. А. Пилюгина» накоплен опыт по созданию, метрологической сертификации и эксплуатации в составе автоматизированных рабочих мест высокоточных углозадающих поворотных столов типа: индуктивный цифровой углоизмерительный прибор ИЦДУ-2, углозадающий комплекс УК и цифровой поворотный стол СПЦ-383(см. таблицу 1).

Точность задания и измерения угла поворотным столом (ПС) определяется, главным образом датчиком угла и качеством исполнения механической части (опор вращения, привода).

Конструктивные особенности ИЦДУ-2 и УК приведены в [1, 2]. В этих поворотных столах использованы индукционные датчики угла высокого разрешения собственного производства. В ИЦДУ-2 применен фазовый преобразователь угла с вращающимся модулятором [3], в УК – двухотсчётный цифровой позиционный преобразователь угла с калибровкой и коррекцией погрешности по методу частотно-пространственной селекции [4]. Методы алгоритмической компенсации в поворотных столах с индукционными датчиками угла (ДУ) подробно рассмотрены в [5, 6].

При создании цифрового поворотного стола СПЦ-383 была поставлена задача разработать точный углозадающий поворотный стол, который может тиражироваться для большого количества рабочих мест предприятия. В СПЦ-383 [7, 8] удалось достичь высокой точности при простом исполнении механической части поворотного стола за счет применения бесконтактного оптического датчика угла высокого разрешения и оригинальных запатентованных конструктивных решений и алгоритмов обработки информации и управления [8, 9, 10, 11].

¹ Начальник научно-исследовательской лаборатории.

² Кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор.

³ Ведущий инженер-конструктор.

⁴ Инженер-программист.

⁵ Главный конструктор, директор.

⁶ Студент 4 курса, факультет ВМК.

⁷ Руководитель отдела 253.

Таблица 1 - Технические характеристики поворотных столов

Наименование параметра	СПЦ-383	ИЦДУ-2	УК
Диапазон измеряемых углов, ...°	± 360	± 360	± 360
Управление	ручн./авт./программное		
Положение оси вращения	гориз./вертик.		
Тип датчика угла	Оптический инкрементный	Индукционный абсолютный	Два индукционных абсолютных
Тип опор вращения	Подш. скольжения	ш/п	
Погрешность измерения углов, не более ..."	± 0,35	± 0,5	
Разрешающая способность, ..."	0,01	0,01	0,0127
Погрешность позиц., не более, ..." автоматический режим ручной режим	± 1 ± 0,2	± 5 ± 0,1	± 2,5 ± 0,1
Масса испытуемого прибора, не более, кг	50	20	
Номер в Гос. реестре СИ	56458-14	44738-10	58244-14

Цифровой поворотный стол СПЦ-383 состоит из механической части – поворотного стола СП-382 и блока управления БУ-226 (см. рисунок 1).



СП-382

БУ-226

Рисунок 1 - Цифровой поворотный стол СПЦ-383

Стол может работать автоматически по заранее написанному сценарию или его работой может дистанционно управлять оператор из отдельного помещения. Результаты испытаний сохраняются в базу данных на жестком диске блока управления и передаются по локальной сети в резервную базу данных на сервер.

В блоке БУ-226 размещена современная сервисная электроника на базе высокопроизводительных микропроцессоров последнего поколения. Это позволяет реализовать сложные алгоритмы компенсации систематической погрешности поворотного стола и повысить точность задания и измерения углов.

Ось вращения поворотного стола выполнена в виде стального шпинделя с конусными подшипниками скольжения. В [9, 10, 11, 12, 13] рассматривались конструктивные особенности такого исполнения. Было показано, что путем тщательной доводки опорного узла удалось достичь высокой стабильности пространственного положения оси, иметь малые паразитные колебания в радиальном и осевом направлениях (на уровне образцов, выполненных на прецизионных шарикоподшипниках). Конструкция позволяет обеспечивать при небольших габаритах высокую нагрузочную способность (до 50 кг), что является немаловажным при испытаниях высокоточных навигационных приборов, например, гироскопов.

Структура погрешностей цифрового поворотного стола СПЦ-383

В ходе работ по созданию первых образцов СПЦ-383 была разработана математическая модель погрешностей поворотного стола и проведено большое количество испытаний по уточнению в ней значимых коэффициентов [8, 10, 12]. В общем виде структуру погрешностей поворотного стола можно представить в виде совокупности систематических и случайных погрешностей самого стола, а также инструментальных погрешностей средств измерения, которые могут иметь повторяющийся и случайный характер. Систематические ошибки вызываются неточностью калибровки измерительных инструментов, качеством регулировки, или физическими эффектами, описываемыми математическими или физическими законами (методические погрешности). Данные погрешности, в случае их обнаружения, могут быть описаны количественно, путем многократных измерений или качественно в случае

понимания физических причин, лежащих в их основе. Это позволяет компенсировать данный вид погрешностей [14, 15]. Случайные ошибки вызываются не идеальностью оборудования и условий проведения измерений, и неопределёнными физическими эффектами. Они имеют неизвестную, но предсказуемую амплитуду [16]. В инструментальных погрешностях важную роль играет тщательный подбор образцовых средств измерения, правильность выбора схемы проведения проверки и условия, в которых она выполняется. Исследованию точности углоизмерительных установок и выбору оптимальных схем измерения посвящено большое число работ, в частности [17, 18, 19, 20] и др.

Для выбора оптимальной компенсационной кривой для алгоритмического учета погрешностей ПС необходимо провести тщательный анализ составляющих погрешностей и оценить их вес, а затем отделить шумовую составляющую от устойчиво повторяющихся.

Анализ погрешностей ДУ

Наиболее значимой частью погрешностей в структуре ошибок измерения угла СПЦ-383 являются погрешности датчика угла, которые складываются из погрешностей, полученных при производстве датчика и погрешностей, внесенных при сборке и регулировке СПЦ-383. Структура погрешностей ДУ при производстве представлена на рисунке 2. С левой стороны расположены погрешности при изготовлении МК, с правой – погрешности СГ и интерфейса ДУ при производстве (погрешность электроники).

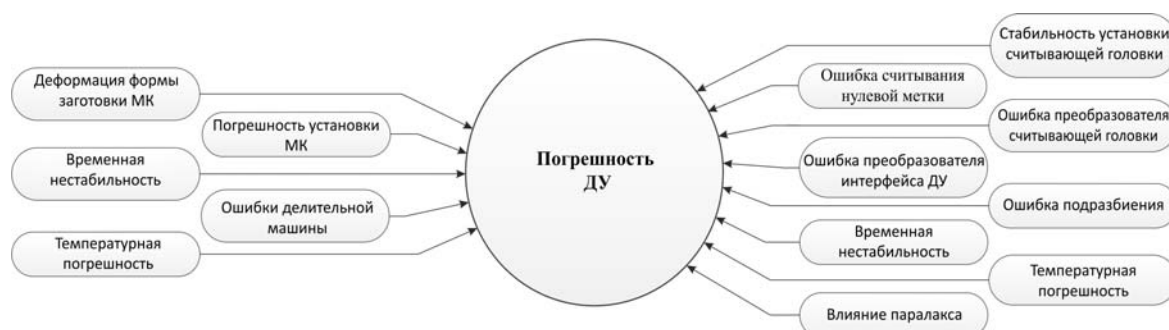


Рисунок 2 - Погрешности, вносимые при производстве датчика угла

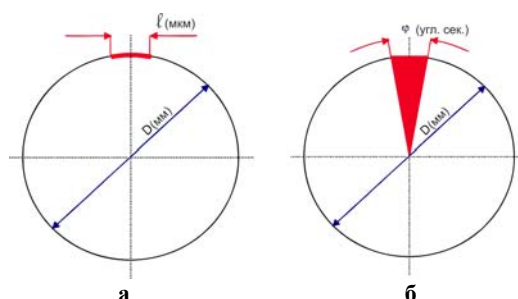


Рисунок 3 - МК с нанесенными штрихами

Конструкция примененного оптического ДУ, технологические особенности его изготовления, присущий данному типу датчиков состав погрешностей подробно рассмотрены в [21]. Рассмотрим вклад каждой составляющей в результирующую погрешность измерения угла. Зависимость угла между штрихами, нанесенными на МК описывается выражением:

$$\varphi = \frac{l \cdot \alpha}{\pi D}, \quad (1)$$

где φ – угол между штрихами, l – расстояние между штрихами, нанесенными на МК [мкм], α – полный угол МК [.."], D – диаметр МК [мм].

Для кольца $\varnothing 200$ мм, $\varphi = 41,1585366''$ (см. рисунок 3).

Погрешность нанесения штрихов приводит к отклонению от номинального значения угла φ и описывается выражаем:

$$\delta\varphi = \frac{\delta l \cdot \alpha}{\pi D}, \quad (2)$$

где $\delta\varphi$ – отклонение от номинального значения угла, $\delta\ell$ – отклонение от номинального расстояния между штрихами.

Отклонение от номинального расстояния между штрихами согласно документации производителя, не превышает 0,5 мкм. Учитывая особенности разбиения шкалы МК при производстве, изменение угла $\delta\varphi$ не накапливается, сохраняется с течением времени.

На рисунке 4 представлены погрешности, обусловленные эксцентриситетом и деформацией МК.

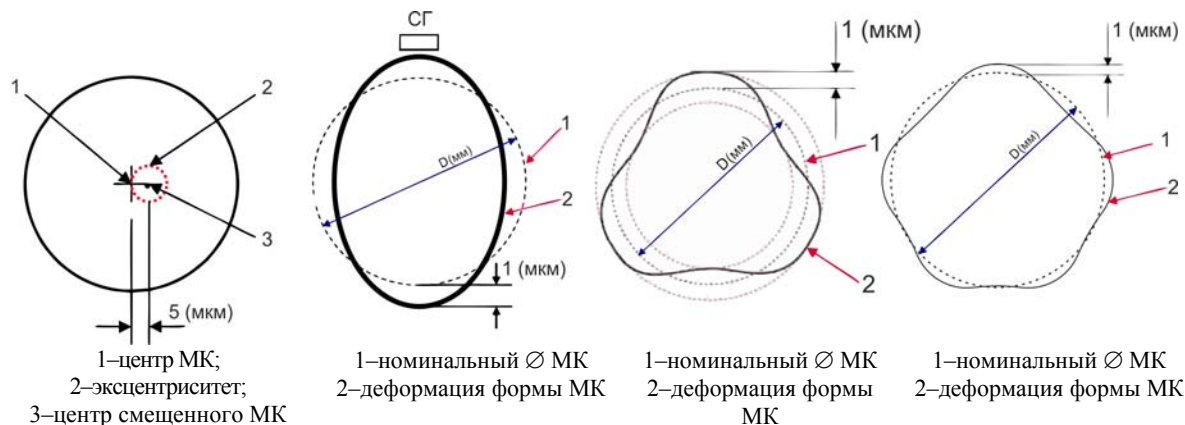


Рисунок 4 - Погрешности МК, обусловленные эксцентриситетом и деформацией

Выражение (3) описывает зависимость изменения угла между штрихами по окружности МК от эксцентриситета.

$$\varphi_i(\alpha) = \varphi + \Delta\varphi_i = \frac{\ell \cdot \alpha}{\pi D} + \left(\frac{\varepsilon \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha_i + \theta)}{\pi D} \right) \quad (3)$$

где $\Delta\varphi_i$ – отклонение угла от номинального значения за счет эксцентриситета,

ε – эксцентриситет [мкм], θ – фазовый сдвиг от начала отсчета, α_i – угол разворота МК [...].

Наличие эксцентриситета $\varepsilon=5$ мкм приводит к погрешности в датчике угла с $\varnothing 200$ мм в 1".

Выражение (4) описывает зависимость изменения угла между штрихами по всей окружности МК от деформации кольца, при этом n – числа граней многогранной фигуры ($n=2$ при овале, $n=3$ при треугольной форме искажений, $n=4$ при квадратной форме и т.д.), в которую деформируется МК.

$$\varphi_i(\alpha) = \varphi + \Delta\varphi_i = \frac{\ell \cdot \alpha}{\pi D} + \left(\frac{\Delta d \cdot \alpha \cdot \sin(\alpha_i + \theta)}{\pi n D} \right) \quad (4)$$

где Δd – отклонение от номинального диаметра, n – числа граней деформированного МК.

Любая нелинейность интерполяции сигнала со считывающей головки приводит к возникновению периодической ошибки, с периодом следования штрихов масштабной шкалы, которую принято называть ошибкой подрабывания. Величина этой ошибки составляет небольшую часть от цены импульса счета на выходе оптического датчика угла и при правильном выборе метода интерполяции достаточно мала. Важное значение играет способность считывающей головки и схемы преобразования поддерживать низкую величину данного вида погрешности в течение длительного времени. Подробнее описание работы СГ и интерфейсов ДУ, способов получения минимальных погрешностей приведено в [15, 21, 22, 23, 24].

Таким образом, производитель гарантирует полную погрешность ДУ для масштабных колец диаметром более 100 мм в устройстве пользователя на уровне $\pm 1''$, при соблюдении рекомендаций по сборке. Остаются только градуировочные ошибки и неустраняемые ошибки подрабывания, которые малы – неустраняемая циклическая погрешности подрабывания не превышает ± 30 нм, т.е. 0,15 % периода шкалы.

Таким образом, все погрешности ДУ повторяются за оборот (носят периодический характер), их можно записать в виде гармонического ряда:

$$\Delta\alpha = \sum_n A_n \cdot \sin(n\alpha + \theta_n) + \sum_m A_m \cdot \sin(mp\alpha + \theta_m) \quad (5)$$

где n – номер длиннопериодной гармоники, m – номер внутривнутрипериодной гармоники,

A – амплитуда n и m гармоники, p – количество штрихов, нанесенных на МК.

Первая сумма в формуле называется длиннопериодной погрешностью и определяется не идеальностью изготовления МК, вторая – внутрипериодной погрешностью, содержит гармонические составляющие, обусловлено погрешностью подразделения сигнала со считывающей головки в интерфейсе датчика угла. При правильной эксплуатации погрешности остаются неизменными на протяжении всего жизненного цикла изделия и могут быть скомпенсированы.

Анализ погрешности ДУ в устройстве пользователя

После установки ДУ в поворотный стол к рассмотренным выше погрешностям добавляются несовершенство самого ПС и ошибки при выставке элементов датчика угла в устройстве пользователя. Структура погрешностей ПС представлена на рисунке 5. С левой стороны расположены погрешности МК, после установки в ПС обусловленные несовершенством оси вращения стола, временной и температурной нестабильностью конструкции, с правой – погрешности электроники ДУ, зависящие от качества ее выставки и калибровки в составе ПС, а также ошибки приема и обработки кода в электронном блоке пользователя (погрешность приема и обработки информации). Погрешности ДУ, рассмотренные на рисунке 3 (погрешность от производителя) после установки датчика становятся составной частью структуры погрешностей ПС.

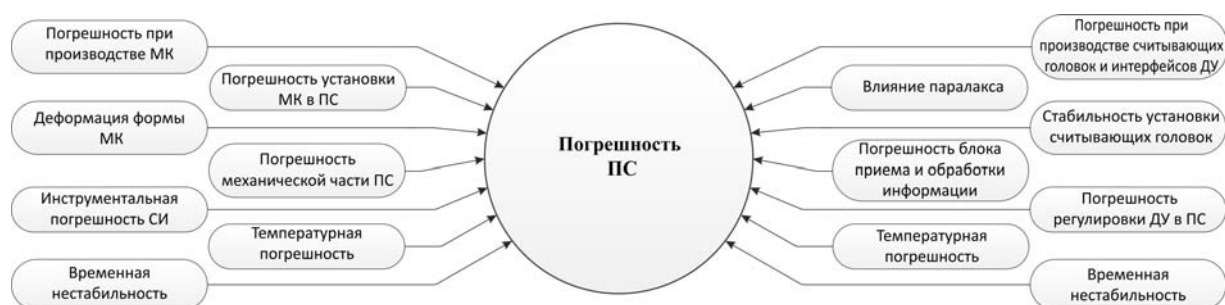


Рисунок 5 - Структура погрешностей ПС

При конструировании и в процессе сборки ПС необходимо учитывать, что в подшипниках, на которых установлены вращающиеся элементы системы, не должно быть радиального биения, которое неизбежно приводит к боковым смещениям оси вращения, также не должно быть деформаций (кручения) вала, на котором закреплен энкодер. При жестком креплении энкодера на валу вращения в непосредственной близости от платформы с проверяемыми приборами, выборе высококачественных сталей для шпинделя, согласовании используемых материалов по КЛР данный вид погрешности пренебрежимо мал. Нестабильность оси вращения поворотных столов различных конструкций рассмотрены в [12, 25]. Для снижения погрешностей, немаловажно учитывать рекомендации производителя при установке считывающих головок. Считывающая головка должна быть жестко установлена на корпусе ПС, причем так, чтобы при считывании оптического сигнала от штрихов МК отсутствовал параллакс и другие геометрические ошибки [22].

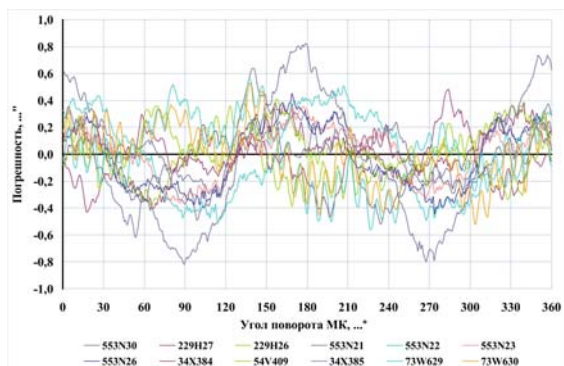


Рисунок 6 - Графики погрешностей МК

Использование двух диаметрально противоположных считывающих головок позволяет скомпенсировать эксцентриситет и ошибки от деформации кольца в фигуру с нечетным количеством граней, а также радиальные перемещения оси вращения

(перемещение перпендикулярно оптической оси считывающих головок), обусловленные биением в подшипниках ПС.

Сигнал с интерфейсов ДУ поступает в устройство преобразования кода в приращение угла. Устройство реализовано на высокопроизводительном DSP-процессоре. Учитывая высокое быстродействие процессора и выбранные оптимальные алгоритмы, погрешность вычисления приращения угла (счет последовательности импульсов с интерфейсов). Вычисление числа импульсов пропорциональных развороту шпинделя поворотного стола с закрепленным МК (работа с числами с плавающей запятой) производится в процессоре одноплатного компьютера. Таким образом, погрешность вычисления угла сведена к минимуму.

Анализ сертификатов МК

Аналізу подвергнуты 10 оптических ДУ, установленных в СПЦ-383, для этого обработаны графики, приведенные в сертификатах, прилагаемых производителем к каждому МК (кольца \varnothing 200 мм). Все графики подвергнуты обработке (Фурье – анализу) для выявления характерных гармонических погрешностей, вносимых при производстве. Результаты разложения приведены в таблице 2, при этом гармоники выше 12 порядка имеют пренебрежимо малую амплитуду и в связи с этим в таблицу не включены.

В приведенных результатах существенную величину (более 0,05") имеют гармоники номер 1, 2, 5, 6. При производстве МК основной вес составляют длинопериодные гармоники, обусловленные эксцентриситетом и искажением формы кольца (многоугольники с небольшим числом граней). Более высокие гармоники имеют малый вес (менее цены младшего разряда). На рисунке 6 приведены графики рассмотренных колец. Графики показывают высокую культуру производства изготовителя, так как просматривается повторяемость результатов на МК, выпущенных в разный период времени.

Таблица 2 - Результаты разложения сертификатов МК в ряд Фурье

Зав. № МК	Погрешность по сертификату МК		Амплитуда гармоник									
	угла, ..."	линейн., мкм	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A10	A12
34X384	±0,49	±0,24	0,020	0,162	0,045	0,030	0,102	0,130	0,008	0,016	0,048	0,008
34X385	±0,64	±0,31	0,044	0,276	0,086	0,037	0,133	0,141	0,004	0,011	0,054	0,004
54V409	±0,40	±0,20	0,135	0,095	0,063	0,030	0,116	0,092	0,006	0,003	0,050	0,033
73W629	±0,56	±0,27	0,210	0,169	0,051	0,069	0,113	0,096	0,006	0,020	0,039	0,025
73W630	±0,53	±0,26	0,210	0,003	0,063	0,042	0,113	0,115	0,008	0,016	0,057	0,024
229H26	±0,42	±0,20	0,047	0,193	0,019	0,010	0,047	0,091	0,007	0,009	0,034	0,004
229H27	±0,41	±0,20	0,054	0,202	0,018	0,006	0,049	0,080	0,006	0,007	0,041	0,005
553N21	±0,82	±0,40	0,058	0,656	0,001	0,058	0,033	0,070	0,006	0,002	0,054	0,007
553N22	±0,51	±0,25	0,059	0,417	0,006	0,021	0,028	0,051	0,006	0,006	0,060	0,012
553N23	±0,36	±0,18	0,055	0,234	0,003	0,051	0,027	0,051	0,005	0,020	0,048	0,004
553N26	±0,47	±0,23	0,042	0,306	0,003	0,044	0,030	0,075	0,007	0,011	0,052	0,036
553N30	±0,32	±0,16	0,030	0,208	0,005	0,075	0,025	0,064	0,006	0,011	0,067	0,008

Анализ погрешностей средств измерений

При испытаниях поворотных столов СПЦ-383 были использованы приведенные в методике поверки МП 253-13-295 алгоритмы и схема проведения испытаний, а также методы расчета погрешностей.

На предприятии, применяются следующие образцовые средства: многогранные призмы (см. таблицу 3), цифровой автоколлиматор TA1000-140 фирмы Trioptics GmbH (разрешение 0,01", повторяемость 0,025", поле обзора: 660" - по вертикали, 490" - по горизонтали, свидетельство о поверке № H2511-7-354/15).

Таблица 3 - Характеристики образцовых призм, имеющихся на предприятии

Наименование	Призма Higerl Watss №131974	Призма 4-24-0 ГОСТ 2875-88 №187	Призма Higerl Watss №266633
Количество граней	8	24	36
Класс точности по ГОСТ2875-88	0	0	0
№ свидетельства о поверке	H2511-7-1469/15	H2511-7-253/14	H2511-7-1470/15
Доверительная погреш. результатов поверки при доверительной вероятности 0,95, ..."	0,2	0,12	0,3

Для проверки цифрового поворотного стола СПЦ-383 было разработано специальное программное обеспечение, которое позволяет синхронизировать поворотный стол и цифровой автоколлиматор (АК) для проведения проверки в автоматическом режиме. Кроме того, в ПС был реализован механизм сценариев [26, 27], который позволяет осуществлять разворот поворотного стола в заданное угловое положение (последовательно наводиться на каждую грань призмы), и при этом производит опрос внешнего устройства – цифрового автоколлиматора. Точность позиционирования на каждую грань призмы по сценарию не хуже $\pm 1''$ (может быть повышена до $\pm 0,25''$), что позволяет использовать автоколлиматор в режиме нуль-индикатора (режим минимальной погрешности). Согласно методике, поворотный стол с установленной образцовой призмой (24 грани) производит последовательно разворот на каждую грань призмы по часовой стрелке, при этом, фиксируются значения угла, измеренные ПС и автоколлиматором. По завершению цикла замеров на всех гранях призмы ПС осуществляет разворот

против часовой стрелки, проводя аналогичные измерения. Оценка погрешности поворотного стола осуществляется по результатам 10 реверсивных оборотов.

Проведем оценку вклада СИ в общую погрешность поворотного стола.

Согласно, МП 253-13-295 расчет суммарной погрешности углов определяется по формуле:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{S_{\kappa}^2}{3} + \frac{S_{np}^2}{3} + S^2 + \frac{\Theta^2}{3}}, \quad (6)$$

где: S - случайная погрешность результата измерения, определяемая СКО результата измерения углов; Θ - систематическая погрешность результата измерения, S_{κ} – суммарная погрешность автоколлиматора (берется из эксплуатационных документов автоколлиматора), S_{np} – суммарная погрешность многогранной призмы.

Для определения веса инструментальных погрешностей средств измерений подставим значения погрешностей автоколлиматора и многогранной призмы в выражение (6), приравняв систематическую погрешность проверяемого стола нулю и выбрав случайную погрешность результата измерения ПС, равной $S=0,05''$ (единица младшего разряда углового энкодера).

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{0,05^2}{3} + \frac{0,12^2}{3} + 0,05^2 + \frac{0^2}{3}} = \sqrt{0,0081} = 0,09$$

Таким образом, погрешность от средств измерений составляет 30 % от допуска на погрешность измерения поворотного стола ($\pm 0,35''$).

При использовании испытательной базы и образцовых средств измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», с которыми производились испытания на утверждения типа (призма 24-гранная №1-80. Свидетельство о поверке №253-12-85В от 13.05.12, диапазон измерений угла (0-360)°, $S_{\Sigma}=0,05''$, автоколлиматор цифровой из состава эталона ГЭТ 22-80, диапазон измерений угла $\pm 5'$, $S_{\Sigma}=0,03''$) вклад инструментальной погрешности может быть снижен до $0,06''$, что составляет 18 % от допуска на погрешность измерения угла цифровым поворотным столом.

Анализ результатов испытаний ПС

Для количественной оценки реальных погрешностей ПС и подтверждения значений, заявленных производителем ДУ, проведен ряд экспериментов:

- проверка погрешности подразделения интерфейсами ДУ;
- проверка разрешающей способности измерительной системы ПС;
- проверка долговременной стабильности углового положения после разворота ПС;
- проверка точности позиционирования.

Проверка погрешности подразделения ДУ проводилась методом сравнения показаний АК с показаниями ПС при измерении приращения малого угла ($10''$). Контроль проводился на одном зеркале призмы в диапазоне $\pm 80''$. Испытания были повторены на каждой грани призмы. Таким образом, проведено 24 цикла испытаний (см. рисунок 7а). Более детально были исследованы на одной грани призмы развороты стола с меньшим шагом ($1''$) (см. рисунок 7б). Анализ полученных результатов и графиков подтверждает заявленную производителем высокую точность подразделения.

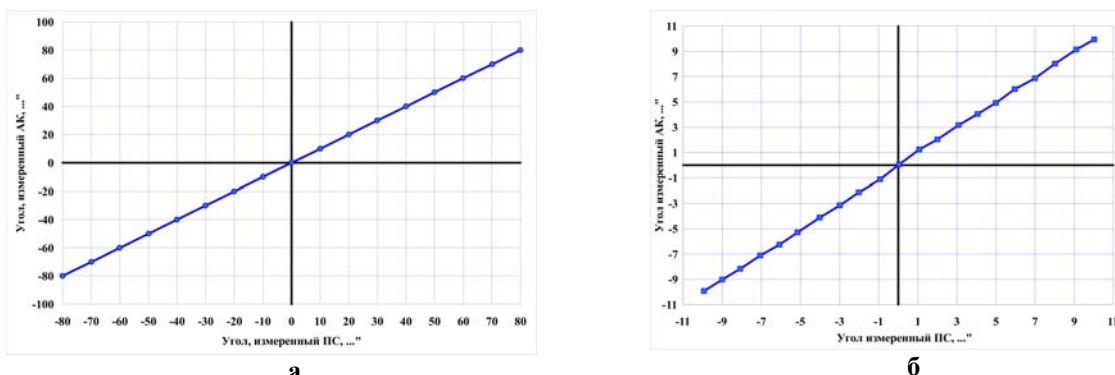


Рисунок 7 - График погрешности подразделения ДУ

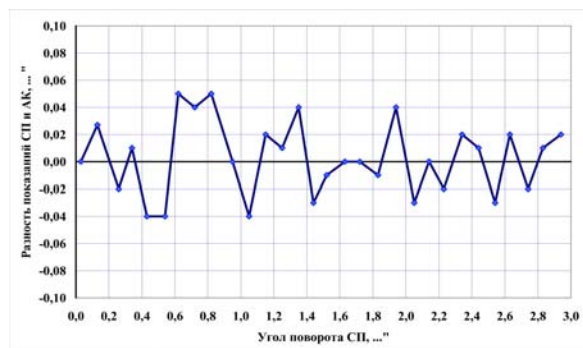


Рисунок 8 - Разность показаний ПС и АК, при задании малых приращений угла

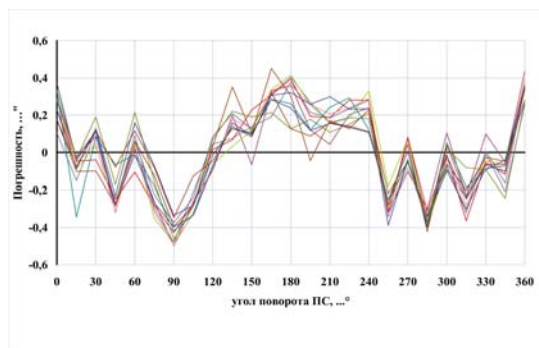


Рисунок 9 - График погрешности ПС при долговременном наблюдении

Для проверки разрешающей способности измерительной системы ПС были проведены испытания, при которых маховичком точной наводки (в ручном режиме) поворотной платформе с закрепленной призмой задавали приращение угла, равное $0,05''$ (единица младшего разряда ДУ с МК $\varnothing 200$ мм и интерфейсом, имеющим коэффициент подрабизия 400), одновременно с помощью АК фиксировались приращения угла по зеркалу призмы. Результаты испытаний представлены на рисунке 8. Эксперимент показал хорошую сходимость показаний АК и ПС.

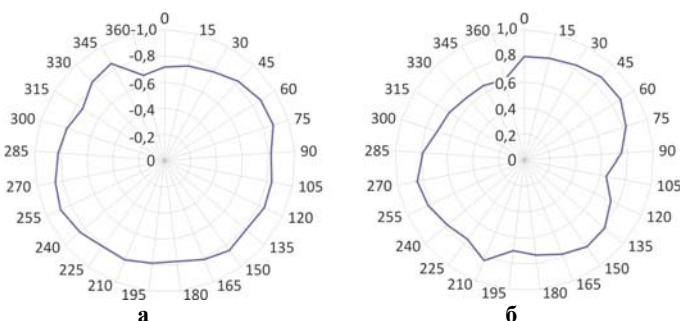


Рисунок 10 - Точность позиционирования поворотного стола

Для проверки долговременной стабильности были проведены наблюдения за параметрами СПЦ-383 зав. №20199106 в период с февраля 2014 г. по апрель 2016 г. Графики зависимости погрешности за истекший период представлены на рисунке 9. Анализ показывает хорошую повторяемость результатов испытаний, изменение с течением времени погрешности ПС не значительны – находятся на уровне случайной составляющей погрешности поворотного стола. Это говорит о

высоком качестве сборки и стабильности конструкции механической части ПС.

Для проверки точности позиционирования были использованы результаты испытаний, проведенных для контроля погрешности ПС. Для этого обработаны измерения, полученные по 10 реверсивным циклам измерений угла выполненных по МП 253-13-295. При приведении испытаний в сценарии была задана точность позиционирования $1''$. Результирующие графики представлены на рисунке 10. Систематическая ошибка позиционирования ПС при движении по часовой стрелке составляет $-0,75''$, при этом отклонения в 240 установках находится в трубке $\pm 0,25''$ (см. рисунок 11а). Аналогичные результаты получены при движении против часовой стрелки (см. рисунок 11б). Разность знаков систематической составляющей обусловлена особенностями алгоритмов управления разворотами ПС [10, 28].

Существующая методика алгоритмической компенсации погрешностей ПС

В предыдущих работах [8, 29] рассказывалось об алгоритмах введения программной компенсации погрешности. В них для компенсации цифрового поворотного стола СПЦ-383 предлагалась следующая методика. По 10 циклам реверсивных замеров, получали 2 усредненные кривые (при вращении по часовой стрелке и против часовой стрелки), затем из 24 точек каждой кривой методом кусочно-линейной аппроксимации строились компенсационные кривые для разного направления вращения ПС.

Результаты показывали, что погрешность стола СПЦ-383 незначительно зависит от направления вращения (см. рисунок 11а). Наблюдаемые рассогласования связаны с колебаниями оси вращения планшайбы поворотного стола из-за неидеальности опорных подшипников. Поэтому, данные для различных направлений вращения обрабатывались и учитывались отдельно.

При таком подходе компенсационные кривые являются совокупностью как систематических, так и случайных погрешностей, так как случайные выбросы могли приводить к существенным ошибкам в получаемых кривых. Разность двух кривых (по и против часовой стрелки) могли быть обусловлены только линейными перемещениями шпинделя в подшипнике скольжения ПС (зазоры в подшипнике

минимальны – не превышают (0,3-1) мкм), а также отклонением формы результирующей кривой от присутствия, существенных случайных выбросов.

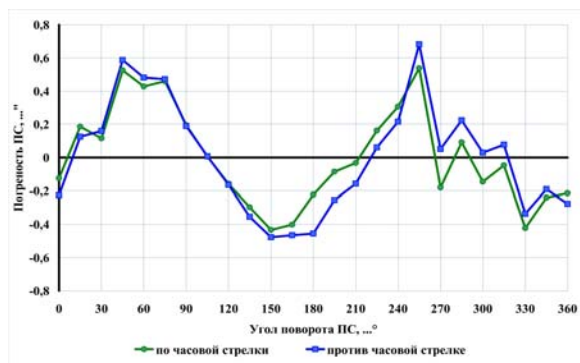


Рисунок 11а - СП зав. №45499103, до компенсации

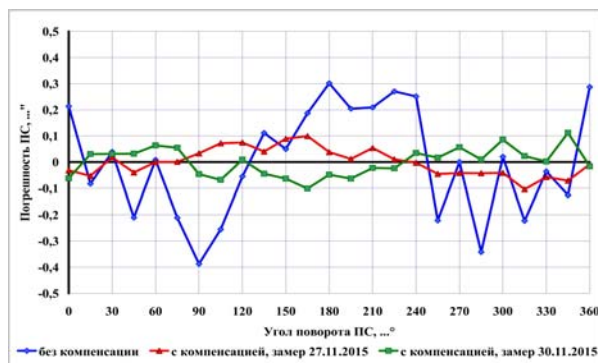


Рисунок 11б - График погрешности ПС зав. №45499105 до и после компенсации

На рисунке 11б приведены графики погрешностей ПС зав. № 45499103 до компенсации погрешности (среднее значение по 10 реверсивным оборотам) и после компенсации, проведенные методом кусочно-линейной аппроксимации сглаженной кривой. Проверка параметров проводилась дважды. Различие в двух скомпенсированных кривых, полученных в разные дни, говорит о не полной компенсации первой гармоники, вероятно связанной с алгоритмом получения компенсационной кривой.

Предлагаемый метод компенсации

Учитывая, что погрешности ПС носят периодический характер, причем доминируют длиннопериодные гармоники, рекомендуется подвергать усредненную кривую погрешностей, полученную при 10 реверсивных оборотах, следующей обработке:

- погрешности, полученные на каждой грани призмы, анализировать по отклонению от среднего значения, а погрешности, выходящие за трубку $\pm 3\sigma$, считать выбросами;
- по массиву данных с отсеянными выбросами строиться новая усредненная кривая;
- полученный массив подвергается Фурье-анализу, при этом находятся амплитуды и фазы значимых гармоник;
- компенсационная кривая строиться по гармоникам, имеющим амплитуду, не превышающую единицы младшего разряда ДУ. Причем должно выполняться условие – $A_n < N/2$ (где N число граней) призмы.

В случае использование методики с перестановками призмы [20, 30] число рассматриваемых гармоник увеличивается в z раз и $A_n < z \cdot N/2$

При испытаниях с 24-гранной призмой рассматриваются только гармоники из ряда 1...10, более высокие гармоники не рассматриваются. Для построения компенсационной кривой в этом случае используется следующее выражение:

$$\Delta\alpha = A_1 \cos(\alpha + \theta_1) + A_2 \cos(2\alpha + \theta_2) + A_3 \cos(3\alpha + \theta_3) + \dots + A_{10} \cos(10\alpha + \theta_{10}) \quad (7)$$

Для проверки правильности выбранного метода компенсации, был проведен анализ результатов испытаний ранее изготовленных поворотных столов. По имеющимся данным были получены компенсационные кривые, методом математического моделирования проведена компенсация систематической погрешности. Результаты моделирования положительные. Затем была проведена компенсации на имеющемся образце поворотного стола СПЦ-383 зав. № 20199106. График погрешностей (усредненный график по 10 реверсивным замерам) представлен на рисунке 12. В таблице 4 приведены результаты Фурье-анализа. Значения амплитуды и фазы из таблицы 4 подставлены в выражение (7) и получена компенсационная кривая (см. рисунок 13). На рисунке 14 приведены результаты проведенной алгоритмической компенсации. Испытания поворотного стола СПЦ-383 зав. № 20199106 после введения компенсации проведены дважды (см. рисунок 14). Как видно из графика предложенная методика показывает хорошие результаты.

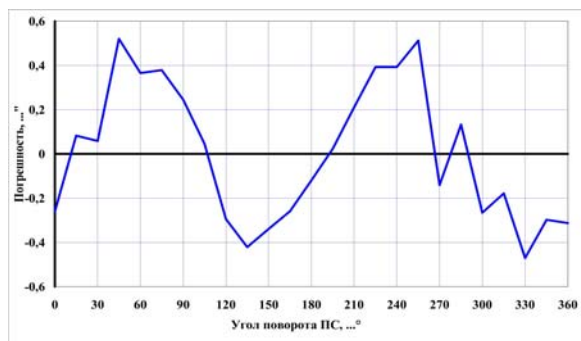


Рисунок 12 - Погрешность ПС до компенсации

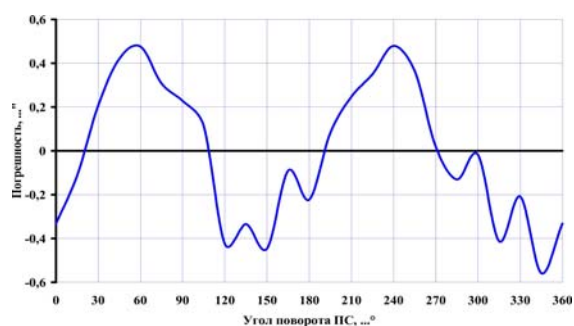


Рисунок 13 - Компенсационная кривая

Таблица 4.

№ Гармоники (n)	Амплитуда (A_n)	Фаза (θ_n)
1	0,039	188,95
2	0,410	241,95
3	0,069	156,95
4	0,049	147,95
5	0,069	229,95
6	0,019	111,95
7	0,039	74,95
8	0,039	203,95
9	0,059	248,05
10	0,029	317,95

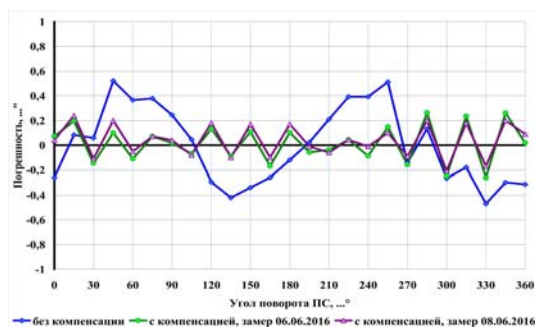


Рисунок 14 - Погрешности ПС после алгоритмической компенсации

Выводы

Представленный в статье метод алгоритмической компенсации систематической погрешности, показал хорошие результаты. При этом погрешность после компенсации уменьшилась более чем в 2 раза при точности измерения угла на уровне эталонных средств измерения. Для улучшения предложенного метода необходимо:

а) использовать образцовые призмы с большим числом граней либо применять метод с переустановкой призмы во время измерения, для увеличения количества данных, используемых для формирования компенсационной кривой;

б) снизить вес инструментальных погрешностей за счет использования более точных образцовых средств измерения либо за счет применения известных способов минимизации влияния погрешности средств измерения на результаты испытаний [19, 20];

в) для использования метода переустановок призмы во время проверки необходимо создание устройства, обеспечивающего строгий поворот призмы вокруг оси измерений без аксиального и углового смещения (с исключения угловых перемещения зеркала по ортогональным осям к оси измерения). Работы по созданию такого устройства в настоящий момент проводятся на предприятии.

Литература:

1. Приборы углоизмерительные индукционные цифровые ИЦДУ-2. Описание типа средств измерения – <http://www.fundmetrology.ru/>.
2. Комплексы углозадающие УК. Описание типа средств измерения – <http://www.fundmetrology.ru/>.
3. **Ахмеджанов, А. А.** Высокоточные преобразователи угловых перемещений // М. Энергоатомиздат, 1985. – 128 стр.
4. **Дорохин, Ю. П.** Прецизионный автоматизированный углозадающий комплекс / Ю.В. Ленский, А.С. Максаев // «Труды Международной научно-технической конференции (МНТК) «Системы и комплексы автоматического управления летательных аппаратов», посвященной 105-летию со дня рождения академика АН СССР Н.А. Пилюгина». М.: ФГУП «НПЦАП», 2013, 355 с, 226 илл. – С.150-154.
5. **Дорохин, Ю. П.** Двухканальный прецизионный преобразователь угла с автономной калибровкой и коррекцией погрешности / И.П. Глаголе, Ю.П. Дорохин, Е.Л. Межирицкий // Труды «ФГУП НПЦАП» «Системы и приборы управления» №2 – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С.20-27.

6. **Бохман, Е. Д.** Исследование погрешности преобразователей угла с микропроцессорной автокоррекцией / М.Н. Бурнашев, Ю.В. Филатов, Д.П. Лукьянов, А.В. Миронов, П.А. Павлов, В.Д. Аксененко, И.Е. Гутнер, О.К. Епифанов, С.И. Матвеев. // Гироскопия и навигация-2005.-№4.-С.72-82.
7. Столы поворотные цифровые СПЦ-383. Описание типа средств измерения – <http://www.fundmetrology.ru/>.
8. **Калдымов, Н. А.** Прецизионный полноповоротный углозадающий стол для испытаний элементов инерциальных приборов / Н.А. Калдымов, С.Ф.Нахов, А.В.Полушкин, И.В. Слистин, Р.В. Ермаков, С.Н.Шацков, В.Ф.Васильев // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.:ОАО «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. - С.119-123.
9. **Полушкин, А. В.** Повышение точности позиционирования платформы прецизионного поворотного стола путем введения алгоритмов управления трением / А.В. Полушкин, Р.В. Ермаков, Н.А. Калдымов, С.Ф. Нахов, П.К. Плотников, Л.П. Лисицкий // XXI МКИНС - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С.80-86.
10. **Полушкин, А. В.** Оптический углоизмерительный комплекс на базе цифрового автоколлиматора для автоматизированных проверок углозадающих и углоизмерительных приборов / Р.В. Ермаков, Н.А. Калдымов, С.В. Лахаткин, С.Ф. Нахов, И.В. Слистин // «Труды Международной научно-технической конференции (МНТК) «Системы и комплексы автоматического управления летательных аппаратов», посвященной 105-летию со дня рождения академика АН СССР Н.А. Пиллогина» М. ФГУП «НПЦАП», 2013, 355 с, 226 илл. – С.179-188.
11. **Полушкин, А. В.** Теоретико-экспериментальная модель неравномерности движения вала углоизмерительного поворотного стола и результат её использования для повышения точности калибровки навигационных приборов / А. В. Полушкин, Р. В. Ермаков, Н. А. Калдымов, С. Ф. Нахов П. К. Плотников // XXI МКИНС - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С.353-359.
12. **Слистин, И. В.** Аспекты конструирования универсального углозадающего поворотного стола для целей приборостроения / И.В. Слистин, Н.А. Калдымов // XVI Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. - С.357-364.
13. **Полушкин, А. В.** Эффекты предварительного смещения в трении скольжения поворотного стола и их использование для повышения точности позиционирования платформы с инерциальными приборами / А.В. Полушкин, Р.В. Ермаков, Н.А. Калдымов, С.Ф. Нахов, П.К. Плотников, Ю.А. Захаров // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. М.: Издательство Академии наук РТ, 2015. С.3049-3050.
14. **Полушкин, А. В.** Разработка и практическое применение автоматического углоизмерительного комплекса для проверки поворотных столов / А.В.Полушкин, Р.В.Ермаков, Н.А.Калдымов, С.Ф.Нахов, Д.Б.Пухов, А.А.Янковский // XXI МКИНС - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С.171-176.
15. **Коротаев, В. В.** Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Часть 1. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений / В.В. Коротаев, А.В.Прокофьев, А.Н. Тимофеев // Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 114 стр.
16. **Барнинова, Е. А.** Метод и результаты исследования случайной погрешности оптического датчика угла / Е.А. Барнинова, С.В. Гордеев, Е.М. Ивашенко, П.А. Павлов // Метрология -2011 -№7 - С.17-25.
17. **Кудрявцев, М. Д.** Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков: дис. канд. техн. наук: 05.13.01, 05.11.15 / М. Д. Кудрявцев. - СПб., 2009. - 153 с.
18. **Lauryna Šiaudinytė.** Research and Development of Methods and Instrumentation for the Calibration of Vertical Angle Measuring Systems of Geodetic Instruments / Vilnius Technika, 2014. – 134 с.
19. **Kim1, Jong-Ahn** Calibration of Angle Artifacts and Instruments using a High Precision Angle Generator / Jong-Ahn Kim1, Jae Wan Kim1, Chu-Shik Kang1, Jonghan Jin1, and Tae Bong Eom1 // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol 14, №3 (2013) pp.367-371.
20. **Ralf D Geckeler1** Calibration of angle encoders using transfer functions / Ralf D Geckeler1, Andreas Fricke1 and Clemens Elster2 // Meas. Sci. Technol. 17 (2006) pp. 2811–2818.
21. К вопросу о точности угловых энкодеров – <http://www.renishaw.ru/>.
22. RESR Angle encoder ring For Renishaw RGH20, RGH34 and RGH40 series readheads – <http://www.renishaw.ru/>.
23. Бесконтактные энкодеры – <http://www.renishaw.ru/>.
24. **Пат. 2433413** Российская Федерация, МПК G 01 P 3/36. Способ повышения точности измерения угла поворота / Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.; - № 2010124366/28; заявл. 15.06.2010; опубл. 10.11.2011, Бюл. № 31. – 9 с.
25. **Полушкин, А. В.** Исследование влияния пространственной нестабильности оси вращения платформы поворотного стола при измерениях на результаты проверок различных типов навигационных приборов и их элементов / А. В. Полушкин, Н. А. Калдымов, Н. В. Дмитриев, С. Ф. Нахов, Ю. В. Ленский, Р. М. Юмагузин, П. К. Плотников, А. А. Янковский // XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. – С.198-210.
26. **Полушкин, А. В.** Использование механизмов сценария для быстрой адаптации автоматизированных рабочих мест под задачи пользователя / А. В. Полушкин, Д. Г. Борчанинов, И. В. Слистин, Н. В. Дмитриев, С. Ф. Нахов // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» М.: Академии наук Республики Татарстан, Том 2, С. 182-195
27. **Борчанинов, Д. Г.** Аспекты создания универсальной структуры базы данных для программного обеспечения проверок навигационных приборов аэрокосмического назначения / Д.Г. Борчанинов, А.В. Полушкин // // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиакосмической отрасли» М.: Академии наук Республики Татарстан, Том 2, С.40-47.
28. **Полушкин, А. В.** Исследование алгоритмов управления шаговым двигателем прецизионного поворотного стола // Проблемы управления, обработки и передачи информации (АТМ-2013): сб. тр. III Междунар. науч. конф.: в 2 т. / под ред. А.А. Львова и М.С. Светлова. Саратов: Издательский Дом «Райт-Экспо», 2013. – Т.1. С.282-289.

29. **Ермаков, Р. В.** Компенсация систематической погрешности углоизмерительной аппаратуры, построенной на основе бесконтактного оптического датчика Renishaw // Сборник докладов VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов ФГУП НПЦАП. С.26-39.
30. Reeve C P The calibration of indexing tables by subdivision NBS Internal Report 75-750 (Gaithersburg, MD: NIST).

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ТОПЛИВ И МАСЕЛ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Г. В. Шувалов¹

ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт метрологии»,
Новосибирск, РФ, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: контроль качества, нефтепродукты, импортозамещение, комплектная лаборатория анализа нефтепродуктов

Качество нефтепродуктов в большинстве регионов России отличается от стандартного, в основном, из-за нарушения условий транспортировки и хранения, поэтому возникает необходимость постоянного контроля качества нефтепродуктов в местах их хранения и продажи. Для решения задач оперативного контроля качества нефтепродуктов на судах речного флота в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии разработан вариант комплектной лаборатории анализа нефтепродуктов «КЛАН-1». В состав лаборатории входит комплект измерительных приборов (анализаторов).

Введение

По данным проверок Росстандарта, проведенных в 2015 году 21 % топлива, реализуемого на рынке, не соответствует установленным требованиям по физико-химическим свойствам. Наиболее частые отклонения по параметрам топлива: несоответствие по массовой доле серы (666 случаев из 3 тысяч), температуре вспышки в закрытом тигле (198 случаев из 3 тысяч).

Между тем, повсеместная практика использования нефтепродуктов свидетельствует, что их качество, в большинстве регионов России, отличается от стандартного, в основном, из-за нарушения условий транспортировки и хранения, поэтому возникает необходимость постоянного контроля качества нефтепродуктов в местах их хранения и продажи. Однако не все методы, используемые при анализе параметров нефтепродуктов, могут удовлетворять требованиям возможности проведения анализа на месте использования нефтепродукта, в том числе, полевые условия.

Рассмотрим кратко нормативно-методическую базу проведения испытаний нефтепродуктов, существующую на настоящий момент в России.

Контроль топлив и масел

Обязательные требования к качеству товарных нефтепродуктов устанавливает технический регламент "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту», а методы испытаний определяет «Перечень национальных стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Технического регламента» [1].

Поскольку Перечень включает множество методов испытаний в виде национальных стандартов, проанализируем эти методы только для дизельного и судового топлива, а также мазута.

Нормативно-методическая база определения параметров указанных топлива приведена в таблицах 1-3.

Таблица 1 - Нормативно-методическая база определения параметров дизельного топлива

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля серы	ГОСТ Р 51947-2002 Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии	Спектроскан Анализатор СИМ-6
Температура вспышки в закрытом тигле	ГОСТ 6356-75 Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле	Анализатор СИМ-5
Фракционный состав	ГОСТ 2177-99 Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава (метод А)	Анализатор СИМ-10

¹ Кандидат технических наук, директор.

Окончание таблицы 1

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля полициклических ароматических углеводородов	ГОСТ Р EN 12916-2008 Определение типов ароматических углеводородов в средних дистиллятах. Метод высокоэффективной жидкостной хроматографии с обнаружением по показателю преломления	Нет
Цетановое число	Экспресс-метод	Анализатор СИМ-3
Смазывающая способность	ИСО 12156-1-Оценка смазывающей способности на испытательном стенде с помощью устройства возвратно-поступательного движения высокой частоты (HFRR).	Нет
Предельная температура фильтруемости	ГОСТ 22254-92 (ЕН 116) Топливо дизельное. Метод определения предельной температуры фильтруемости на холодном фильтре	Нет

Таблица 2 - Нормативно-методическая база определения параметров мазута

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля серы	ГОСТ Р 51947-2002 Нефть и нефтепродукты. Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектрометрии	Спектроскан Анализатор СИМ-6
Температура вспышки в открытом тигле	ГОСТ 4333-87 Нефтепродукты. Методы определения температур вспышки и воспламенения в открытом тигле	Анализатор СИМ-5
Содержание сероводорода	ГОСТ Р 53716-2009 Топлива жидкие. Определение сероводорода	Нет

Таблица 3 - Нормативно-методическая база определения параметров судового топлива

Наименование параметра	Обозначение и наименование стандартов	Прибор экспресс-анализа
Массовая доля серы	ГОСТ 1437-75 Нефтепродукты темные. Ускоренный метод определения серы	Анализатор СИМ-6
Температура вспышки в закрытом тигле	ГОСТ 6356-75 Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле	Анализатор СИМ-5

Из анализа данных таблиц 1-3 видно, что для использования существующей нормативно-методической базы определения параметров нефтепродуктов в полевых условиях имеется ряд приборов различного уровня исполнения по техническим показателям.

Для продления срока эксплуатации судовых дизелей и сокращения время внеплановых простоев из-за ухудшения свойств работающего масла необходима смена масла. Одним из методов, позволяющих устанавливать срок смены смазочных масел, является периодический анализ пробы масла и определение его фактического состояния, т.е. диагностика масла.

Методы диагностирования можно условно разделить на две группы: диагностирование по физико-химическим показателям качества смазочного масла и диагностирование по параметрам примесей (частиц износа, воды и др.) в работающем масле.

Первая группа испытаний позволяет определить срок замены масла, а вторая получить информацию о техническом состоянии тех деталей, которые определяют ресурс судового дизеля.

В «Правилах технической эксплуатации судовых дизелей» приведены показатели предельного состояния моторных масел и методы их определения (таблица 4).

Таблица 4 - Показатели предельного состояния моторных масел и методы их определения

Наименование показателя по ГОСТ 17479.1-85	Предельное значение	Метод определения	
		в теплотехнических лабораториях	в судовых условиях
Вязкость кинематическая, при 100 °С	±20 % от вязкости свежего масла при его разбавлении топливом; ±30 % -при отсутствии в нем топлива	ГОСТ 33-82 ГОСТ 6258-85 (для сильно-загрязненных масел)	СКЛАМТ с дополнением к 924/18-06-013, 1977 г., 924/66-06-702, 1985 г.
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, °С, не ниже	170	ГОСТ 4333-48	СКЛАМТ
Щелочное число, мг КОН на 1 г масла, не менее	1,0 - 15,0	ГОСТ 11362-76	СКЛАМТ, дополнение к СКЛАМТ 924/18-06-013, 1977 г.
Массовая доля нерастворимого осадка, %	1,0 - 4,0	ГОСТ 20684-75	СКЛАМТ (капельная проба)
Массовая доля воды, %	Для дизелей с вкладышами - 0,3; для всех остальных - 0,5	ГОСТ 2477-65	СКЛАМТ Методическое пособие 2042-06-006, 1979 г.
Диспергирующая способность (капельная проба)	0,3 усл. ед.	Методическое пособие, 2042-06-005, 1979 г.	Дополнение к СКЛАМТ924/66-06-702, 1985 г.

В [2] для выявления наиболее значимых показателей качества моторного масла был проведен анализ 135 литературных источников, в которых представлены результаты исследования изменения 33 физико-химических показателей моторного масла в процессе его работы. В ходе ранжирования всех 33 показателей были выбраны 10 наиболее значимых показателей, представленных в таблице 5.

Таблица 5 - Ранжирование по 10 показателям, наиболее часто применяющимся для анализа старения моторного масла

Номер по порядку	Название показателя качества моторного масла	Количество литературных источников	Весовой коэффициент
1	Загрязненность механическими примесями	24	0,242
2	Вязкость	15	0,152
3	Диэлектрическая проницаемость	10	0,101
4	Щелочное число	9	0,091
5	Моюще-диспергирующе-стабилизирующие свойства	8	0,081
6	Содержание воды	8	0,081
7	Кислотное число	7	0,071
8	Плотность	7	0,071
9	Оптическая плотность	6	0,061
10	Температура вспышки	5	0,051
Всего		99	1

По результатам ранжирования факторов, определяющих работоспособность моторного масла, следует, что с учетом весовых коэффициентов наиболее значимыми являются: загрязненность, вязкость, диэлектрическая проницаемость.

Для решения задач оперативного контроля качества нефтепродуктов на судах речного флота в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии разработан вариант комплектной лаборатории анализа нефтепродуктов «КЛАН-1» модификации «С» [3].

В состав лаборатории входит комплект измерительных приборов (анализаторов), приведенных в таблице 6.

Таблице 6 - Перечень приборов для измерения параметров судовых топлив

Наименование измеряемого параметра	Диапазон измерения	Пределы допускаемой погрешности	Марка анализатора
1 Измерение содержания воды, %	0,01 - 2,0	± 10 %	СИМ-4
2 Измерение температуры вспышки, °С (дизтопливо и масла)	20 - 300	± 5 °С	СИМ-5
3 Измерение содержания серы в нефтепродуктах, %	0,01 - 2,00	± 10 %	СИМ-6
4 Диапазон измерения кинематической вязкости, мм ² /с	3,69 - 9,78	± 1,2 %	СИМ-8
5 Измерение содержания механических примесей, %	0,002 - 0,11	± 10 %	СИМ-12

Дополнительно к данным приборам для анализа ферромагнитных примесей в нефтепродуктах можно рекомендовать использовать измеритель магнитной восприимчивости ИМВ.

Прибор работает по принципу первичного магнитомеханического и промежуточного емкостного преобразования сигнала. В качестве первичного преобразователя используется миниатюрный астазированный магнит-индикатор, подвешенный совместно с подвижным электродом дифференциального конденсатора на упругих растяжках. Конструкция измерителя магнитной восприимчивости ИМВ приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Измеритель ИМВ

В начале 2014 года ряд западных стран объявили о введении жёстких санкций в отношении российской экономики. Это активизировало процесс импортозамещения в России, в том числе и на уровне государственной политики. Кроме того, в конце 2014 года курс рубля значительно снизился, что также создает хорошие предпосылки для импортозамещения в различных областях экономики. Это уже проявилось, во-первых, в снижении доли импорта и, во-вторых, высоких темпах роста выпуска отечественной продукции в ряде отраслей, ориентированных на внутренний рынок.

В этой связи рассмотрим основные возможности для импортозамещения методов и средств измерений, применяемых при анализе дизельного (судового) топлива по обязательным показателям технического регламента: содержание серы и температура вспышки.

Определение содержание серы в дизельном топливе проводится согласно ГОСТ Р 51947-2002 "Определение серы методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии", в том

числе и в случаях возникновения спорных ситуаций. Для реализации метода ГОСТ Р 51947-2002 используют энергодисперсионные рентгеновские флуоресцентные анализаторы, если их конструкция включает следующие элементы:

- источник рентгеновского излучения с энергией выше 2,5 кэВ;
- детектор рентгеновского излучения с разрешающей способностью, не превышающей 800 эВ;
- дисплей или принтер, регистрирующий показания содержания серы в процентах.

Кроме рассмотренного метода определения содержания серы может применяться метод, изложенный в ГОСТ Р 51859-2002 "Нефтепродукты. Определение серы ламповым методом". Этот стандарт устанавливает метод определения массовой доли общей серы от 0,01 % до 0,4 % в жидких нефтепродуктах и присадках.

В настоящее время выпускается значительное количество разнообразных средств измерений для определения содержания серы в нефтепродуктах, которые основаны на указанных методах и производятся как в России, так и за рубежом.

Большая часть приборов для анализа содержания серы реализует рентгенофлуоресцентный метод анализа и только один прибор – ламповый метод. Кроме того имеется достаточное количество отечественных средств измерений, в связи с чем импортозамещение в этой области может быть осуществлено без существенных препятствий.

Определение температуры вспышки в закрытом тигле для дизельного топлива проводится по ГОСТ Р ЕН ИСО 2719-2008 "Нефтепродукты. Методы определения температуры вспышки в закрытом тигле Пенски-Мартенса", в том числе и в случаях возникновения спорных ситуаций. Для реализации метода ГОСТ Р ЕН ИСО 2719 используют аппарат Пенски-Мартенса с закрытым тиглем. Обязательные требования к их конструкции изложены в приложении В к ГОСТ Р ЕН ИСО 2719.

Кроме рассмотренного метода определения температуры вспышки в закрытом тигле Пенски-Мартенса может применяться метод, изложенный в ГОСТ 6356-75 "Нефтепродукты. Метод определения температуры вспышки в закрытом тигле". Большая часть приборов реализует метод ГОСТ 6356 и только два прибора – метод ГОСТ Р ЕН ИСО 2719, вместе с тем это приборы отечественного производства.

Выводы

Таким образом, в статье проведен сравнительный анализ отечественных и импортных средств измерений, применяемых при анализе дизельного (судового) топлива по обязательным показателям технического регламента: содержание серы и температура вспышки.

В результате анализа выявлено, что имеется достаточное количество отечественных средств измерений, в связи с чем импортозамещение в этой области может быть осуществлено без существенных препятствий.

Кроме того, в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии разработан вариант комплектной лаборатории анализа нефтепродуктов «КЛАН-1» модификации «С» для диагностики судовых ТСМ путем расширения возможностей базовой комплектной лаборатории анализа нефтепродуктов типа «КЛАН-1».

Литература

1. Шувалов, Г. В. Сравнительный анализ средств измерений показателей нефтепродуктов, применяемых для подтверждения Технического регламента / Г. В. Шувалов, В. Н. Половинкин, И. В. Клековкин, М. Г. Клековкина, О. А. Ясырова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. -2014. - №3. – С. 119-123.
2. Долгова, Л. А., Салмин, В. В. Методика определения показателей качества моторного масла на основе теории подобия // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/02/48863>
3. Шувалов, Г. В. Разработка приборов для определения физико-химических параметров трансформаторного масла [Текст] / А. В. Бондарев, // Материалы междунауч.-техн. конф. «Электроэнергетика, электротехнические системы и комплексы», посв. 100-летию электротехнического образования Сибири, Новосибирск, 2003. – Новосибирск, 2003. - С. 211-214.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Г. В. Шувалов¹

ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт метрологии»,
г. Новосибирск, РФ, e-mail: shuvalov@sniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: температура вспышки, показатели качества нефтепродуктов, содержание серы, анализаторы качества нефтепродуктов

Одним из наиболее важных показателей нефтепродуктов является температура вспышки, которая определяет теплофизические свойства нефтепродуктов и характеризует их способность к воспламенению при нагреве и содержанию серы в нефтепродуктах.

В приведены результаты экспериментальных исследований экспресс-метода определения температуры вспышки нефтепродуктов с помощью анализатора СИМ-5.

Кроме того, были исследованы основные факторы, которые могут вызывать вариации показаний анализатора содержания серы СИМ-6.

Введение

Одним из наиболее важных показателей нефтепродуктов является температура вспышки, которая определяет теплофизические свойства нефтепродуктов и характеризует их способность к воспламенению при нагреве.

Ранее было показано [1], что стандартные приборы различных типов по своему конструктивному исполнению устарели, вследствие чего определение температуры вспышки осуществляется в течение длительного времени (до 1,5 ч). Таким образом, существующие приборы не дают возможности оперативного определения вспышки на местах применения и эксплуатации масел и топлива.

Решение этой задачи может быть связано с уменьшением объема испытуемого нефтепродукта, что позволяет уменьшить время определения температуры вспышки. Кроме того, уменьшение объемов топлива, смазочных и моторных масел при проведении экспресс-диагностики обеспечит существенную экономию нефтепродуктов [2,3].

Экспериментальные исследования

В этой связи были проведены экспериментальные исследования экспресс-метода определения температуры вспышки нефтепродуктов с помощью анализатора СИМ-5. Исследования проводились при изменении объема тигля анализатора, которое было достигнуто с помощью специально изготовленных горизонтальных и вертикальных вставок.

Материалом для изготовления вставок (рисунок 1) послужил алюминий.



Рисунок 2 - Горизонтальные и вертикальные вставки в тигель

Объем тигля без вставок составляет 100 мл, а схематическое изображение тигля с различными вариантами исполнения вставок и полученным объемом испытательного тигля представлено на рисунке 2.

¹ Кандидат технических наук, директор.

При исследованиях проводилось по 3 измерения температуры вспышки трансформаторного масла.
На рисунке 3 приведена типичная зависимость температуры тигля при его нагреве и полученные при
испытаниях значения температуры вспышки.

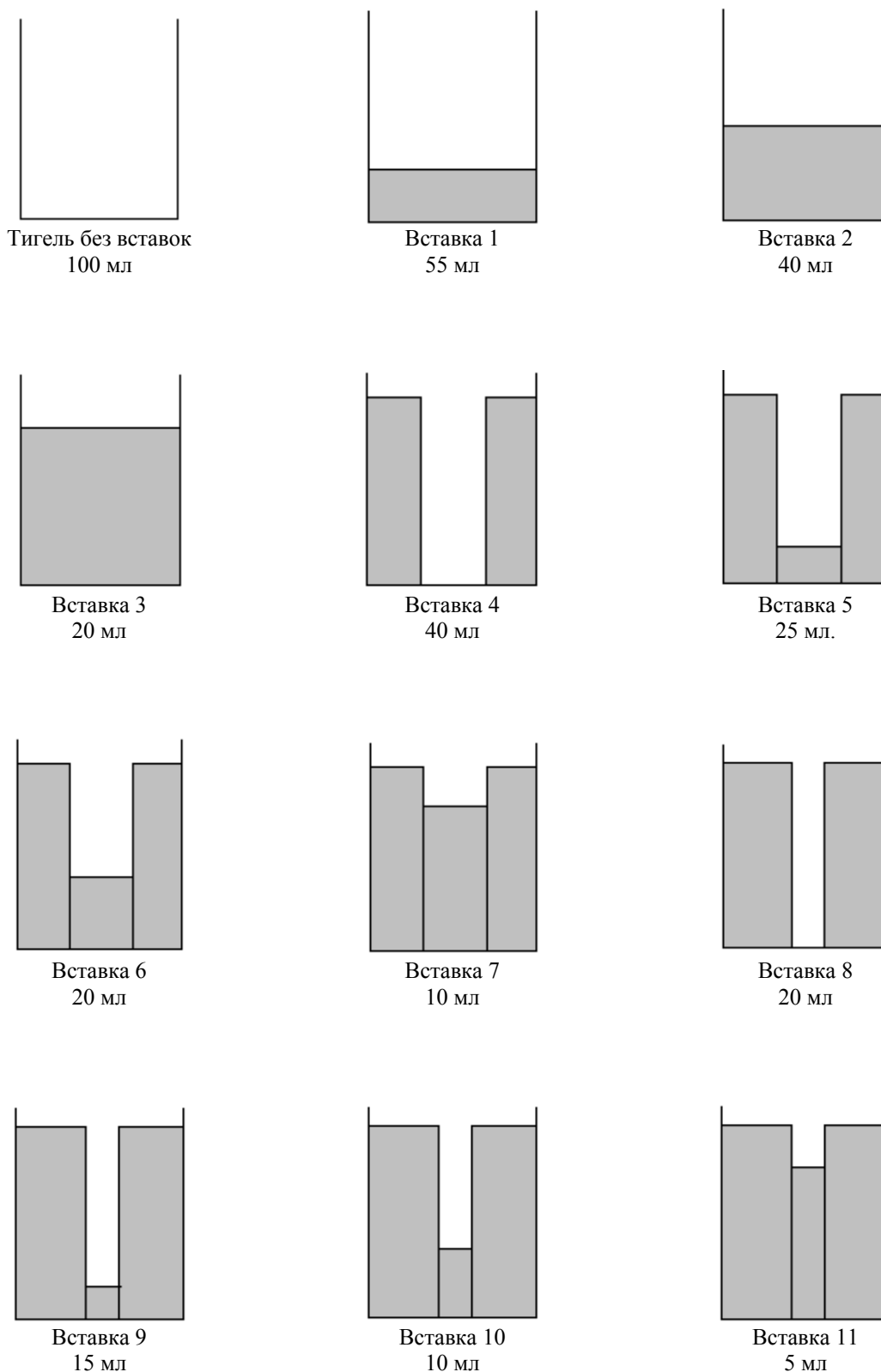


Рисунок 2 - Варианты исполнения вставок и объем испытательного тигеля

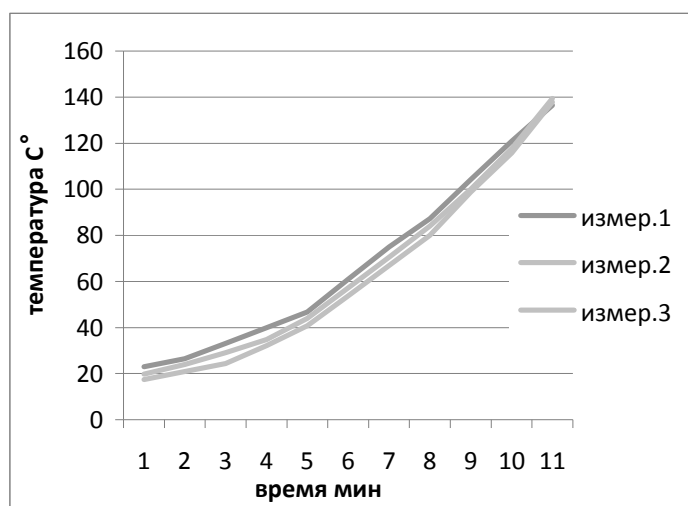


Рисунок 3 - Зависимость температуры от времени с вставкой 3 ($U=60$ В; $T_1=136,5$ °С; $T_2=137,9$ °С; $T_3=139,4$ °С; $T_{cp}=137,9$ °С; $V_{\text{скорость}}=15$ °С/мин)

По результатам измерений была получена зависимость температуры вспышки от скорости нагрева нефтепродукта, представленная на рисунке 4.

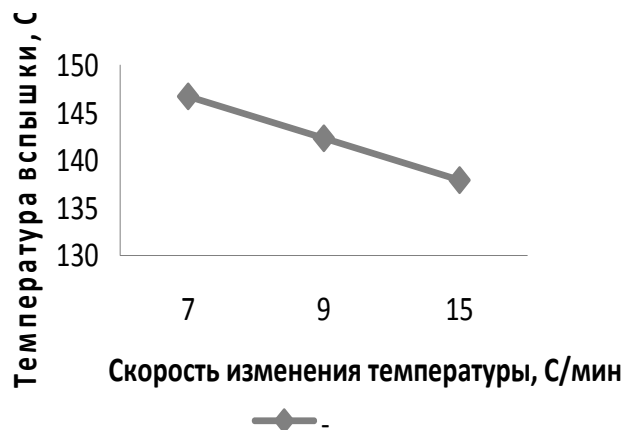


Рисунок 4 - Зависимость температуры вспышки от скорости нагрева нефтепродукта

Из рисунка видно, что с увеличением скорости нагрева температура вспышки нефтепродукта уменьшается. Это связано с тем, что при большой скорости нагрева происходит интенсивное испарение вблизи нагреваемых стенок тигля, в то время как центральная часть нефтепродукта, где установлена измерительная термопара не успевает прогреться. Это приводит к заниженным значениям по температуре вспышки.

В России значительное внимание уделяется экологическим проблемам выбросов на морских и речных судах, например, ГОСТ Р 54299-2010 «Судовые топлива. Технические условия» ужесточает требования к свойствам топлив по отдельным показателям. По этой же причине для повышения экологической безопасности судовых энергетических установок технической регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» предъявляет обязательные требования к качеству судовых топлив по показателям содержание серы и температура вспышки.

В [4] была разработана методика определения серы в нефтепродуктах с использованием кондуктометрического метода, а также прибор с ее использованием [5].

В настоящее время уже выпущено более 60 анализаторов содержания серы СИМ-6 в нефтепродуктах. Это позволило обобщить опыт эксплуатации анализаторов и выявить недостатки в их работе. Так, в некоторых случаях при измерениях содержания серы в топливе анализаторами СИМ-6 наблюдаются вариации показаний прибора, в связи с чем были исследованы основные факторы, которые могут вызывать указанные вариации.

а) Исследование влияния температуры раствора в измерительной ячейке на метрологические характеристики СИМ-6

Для этого проводились последовательные многократные измерения содержания серы в одном и том же образце топлива. В конце каждого определения измерялась температура раствора в измерительной ячейке термометром ЛТ-300. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты измерений содержания серы в одном и том же образце топлива анализатором СИМ-6

Номер испытания	1	2	3	4	5	6	7	8
Измеренное значение серы в топливе, %	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
Температура раствора измерительной ячейке, °С	21,6	22,4	22,7	23,2	23,2	23,3	23,7	23,7

Из таблицы следует, что существует зависимость измеренных значений серы анализатором СИМ-6 от температуры раствора в измерительной ячейке. Оценка количественного значения температурного изменения содержания серы дает величину порядка 0,01 %/°С.

Для подтверждения указанной зависимости были проведены измерения удельной электрической проводимости раствора измерительной ячейки в диапазоне изменения температуры (10 – 20) °С с помощью анализатора жидкости «Мультитест КСЛ-101».

Результаты измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Удельная электрическая проводимость раствора измерительной ячейки анализатора СИМ-6

Температура раствора в ячейке, °С	10,2	11,7	12,8	13,4	14,5	15,8
Проводимость раствора в ячейке, мкСм/см	66,6	68,8	71,9	72,8	74,4	77,7
Температура раствора в ячейке, °С	16,3	17	17,5	18	18,5	19
Проводимость раствора в ячейке, мкСм/см	78,9	79,5	80,3	81,2	81,8	82,9

Из таблицы видно, что температурная зависимость удельной электрической проводимости раствора измерительной ячейки анализатора СИМ-6 составляет порядка 2 %/°С.

б) *Исследование полноты поглощения диоксида серы (SO₂) в растворе измерительной ячейки анализатора*

Для измерения концентрации диоксида серы SO₂ использовался газоанализатор «Хоббит-Т», который был укомплектован двумя датчиками для измерения диоксида серы SO₂ и оксида углерода СО. В первой группе измерений датчик газоанализатора устанавливался на входе перед измерительной ячейкой и измерил концентрацию диоксида серы поступающую в измерительную ячейку при сгорании топлива. При минимальной высоте пламени концентрация диоксида серы перед ячейкой составляли около 10 мг/м³, при максимальной высоте (практически, горение с копотью) – около 30 мг/м³. Результаты испытания изображены на рисунке 5.

Во второй группе измерений датчик газоанализатора «Хоббит-Т» устанавливался на выходе измерительной ячейкой перед компрессором. В ходе испытания этот датчик измерил концентрацию диоксида серы после его поглощения раствором в измерительной ячейке. В течение этого испытания не было зафиксировано следов SO₂, что служит доказательством того, что диоксид серы SO₂, проходя через измерительную ячейку, полностью растворяется в поглотительном растворе, образуя слабый раствор серной кислоты.

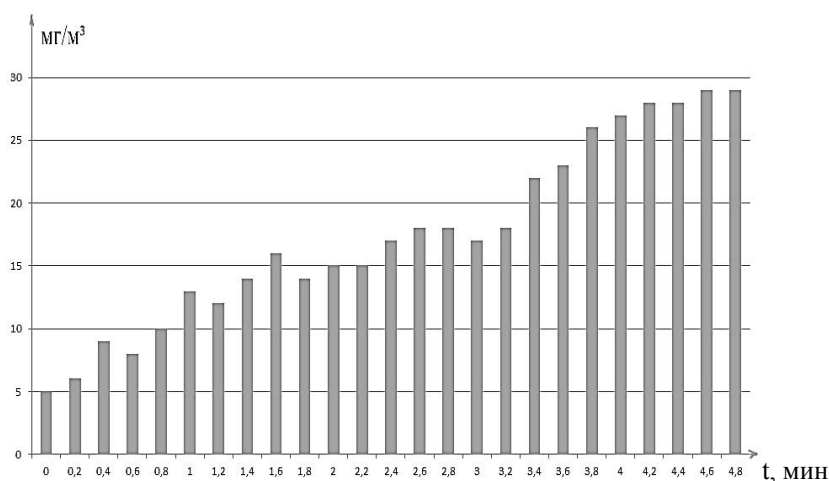


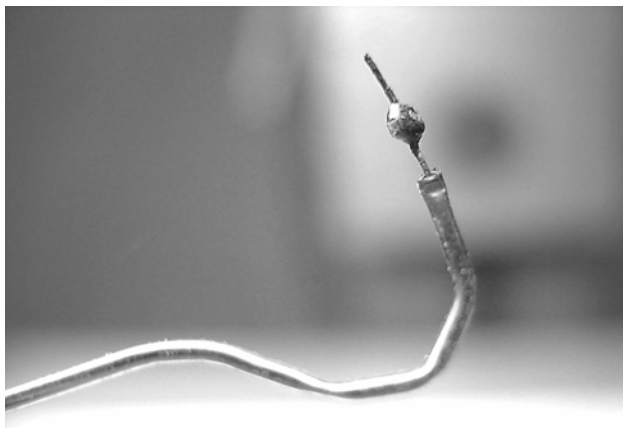
Рисунок 5 - Изменение концентрации диоксида серы поступающую в измерительную ячейку при изменении высоты пламени в горелке

в) Исследование влияния катализаторов на выход диоксида серы при сгорании топлива

Использовались два типа катализаторов:

- проволочка с напылением платинового катализатора, установленная на конце иголки для удобства проведения опыта;

- каталитическая сеточка с оксидом тория и оксидом церия (рисунок 6).



а) платиновый катализатор



б) катализатор в виде сеточки

Рисунок 6 - Катализаторы для окисления топлива при горении

В ходе испытания изменений концентрации диоксида серы SO_2 , с катализатором и без него, зафиксировано не было, но при взаимодействии пламени горелки с сеточкой газоанализатор зафиксировал превышение выделения оксида углерода CO . Если без сеточки концентрация CO при горении топлива не превышала 230 мг/м^3 , то в данном случае она достигала 780 мг/м^3 . Можно предположить, что при наличии катализатора в виде сеточки происходит более полное сгорание топлива, однако на выход диоксида серы это не оказывает влияния.

Выводы

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что уменьшение объема тигля не влияет на значение температуры вспышки нефтепродукта. На значение температуры вспышки нефтепродукта оказывает влияние скорость изменения температуры нефтепродукта. Чем выше скорость изменения температуры нефтепродукта (скорость нагрева), тем меньше температура вспышки, в связи с чем при проведении испытаний необходимо контролировать скорость нагрева нефтепродукта. Для создания метода экспресс-анализа наиболее оптимальной (с точки зрения времени проведения анализа) является вставка 3. При её использовании расход ГСМ уменьшился на 80 %.

Кроме того, проведенные исследования показали, что основным фактором, оказывающим влияние на метрологические характеристики анализатора СИМ-6, является температура раствора в измерительной ячейке. Оценка количественного значения температурной поправки на результат измерения серы дает величину порядка 0,01 %/°С.

Литература

1. **Шувалов, Г. В.** Прибор для определения соединений серы в нефтепродуктах [Текст]: / Г. В. Шувалов// Материалы 6 международной конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП –2002”.: Сб.тр. – Т.3. – Новосибирск, 2002. – с.135-137.
2. **Шувалов, Г. В.** Экономия горючесмазочных материалов при работе двигателей внутреннего сгорания [Текст]/ А. В. Бондарев, И. С. Новиков, [и др.]// Сибирский научный вестник./ Вып. VI. – Новосибирск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2003. – С. 49-52.
3. **Шувалов, Г. В.** Анализатор температуры вспышки нефтепродуктов/ М. А. Мишагин, А. В. Бондарев [и др.]// 2-я междун. науч.-техн. конф., 8-11 сентября 2004 «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт» [Текст]: Часть 2/ Под ред. В. П. Горелова, Н. Н. Лизалека, В. В. Охотниковой. – Тобольск: Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2004. – С. 153-155.
4. **Шувалов, Г. В.** Прибор для определения соединений серы в нефтепродуктах [Текст]: / Г. В. Шувалов// Материалы 6 международной конф. “Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП –2002”.: Сб.тр. – Т.3. – Новосибирск, 2002. – с.135-137.
5. **Шувалов, Г. В.** Опыт практического применения анализаторов СИМ-6 для определения серы в нефтепродуктах [Текст]: / Г. В. Шувалов// Материалы 6 международной выставки и научного конгресса “ГЕО-Сибирь –2010”.: Сб.тр. – Т.5.Ч.2-Новосибирск, 2010.-с.155-158.

ТАХОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ В СУДОСТРОЕНИИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. В. Бурдуков¹

АО «Приборостроительный завод ВИБРАТОР», Санкт-Петербург, РФ,
e-mail: ejсан@ Rambler.ru, тел. +7 (812) 598-92-00, моб. т. +7(952)241-63-05

Аннотация

Ключевые слова: тахометр, тахометрические преобразователи, МТК

Тахометр – измерительный прибор, предназначенный для измерения частоты вращения (количества оборотов в единицу времени) различных вращающихся деталей, таких как роторы, валы, диски и др., в различных агрегатах, машинах и механизмах. Тахометры являются неотъемлемой частью систем автоматического регулирования генераторов, ходовых машин, турбинных агрегатов.

В данной работе вкратце рассматриваются основные принципы построения тахометрических измерительных систем. Более подробно рассматриваются тахометрические преобразователи, применяемые в настоящее время в судовой отрасли. Перечисляются основные типы преобразователей, основные достоинства и недостатки каждого из типов, приводятся примеры конкретных моделей. Во второй части доклада приводится пример построения современного тахометрического комплекса на примере комплекса МТК.

Введение

Тахометр – измерительный прибор, предназначенный для измерения частоты вращения (количества оборотов в единицу времени) различных вращающихся деталей, таких как роторы, валы, диски и др., в различных агрегатах, машинах и механизмах. Применительно к задачам судостроения, к корабельным тахометрическим системам предъявляется весьма широкий спектр требований. Есть системы, в которых требуется измерять и крайне низкие скорости вращения (работа валоповоротных устройств), так и довольно высокие (десятки тысяч об/мин). Как правило, тахометрические системы должны работать в условиях жёстких электромагнитных излучений в непосредственной близости от силовых установок судна, в присутствии насыщенного пара и масел, высокой температуры и значительных механических воздействий. Довольно часто тахометрические измерители являются составной частью защитных систем судна, а также работают в цепях автоматического регулирования. Таким образом, задачи по обеспечению надёжным тахометрическим оборудованием судовой отрасли всегда будут оставаться актуальными.

В данной работе рассматриваются основные принципы построения тахометрических измерительных систем и тахометрических преобразователей, применяемые в настоящее время в судовой отрасли. Более подробно рассматривается ключевой компонент данных систем – тахометрические преобразователи. Во второй части доклада приводится пример построения современного тахометрического комплекса на примере комплекса МТК.

Текст доклада

1. Основные элементы тахометрической измерительной системы

Любая тахометрическая измерительная система включает в себя как минимум один элемент, называемый тахометрическим преобразователем.

В общем случае тахометрический преобразователь – это измерительный преобразователь, предназначенный для выработки сигнала измерительной информации, являющегося функцией измеряемой угловой скорости. Частным случаем данного класса устройств являются преобразователи, входной физической величиной которых является непосредственно сама угловая скорость вращения. Информационным сигналом данных преобразователей, как правило, является какой-либо параметр выходного электрического сигнала (например, напряжение, частота и т.д.). В документации к тахометрическому оборудованию такие преобразователи часто называют «датчиками», либо «первичными преобразователями». Выходной сигнал первичных тахометрических преобразователей в отдельных случаях может подаваться непосредственно на исполнительные устройства, в качестве которых выступают показывающие приборы либо элементы корабельной автоматики. Однако чаще всего сигнал тахометрического преобразователя нуждается в дополнительной обработке (например, усилении, фильтрации помех и т.д.). Указанную задачу выполняет следующий элемент измерительной системы, называемый, как правило, «вторичным преобразователем». Кроме того, в зависимости от требований, предъявляемых к системе, вторичный преобразователь может выполнять следующие функции:

- Контроль выхода измеряемой величины за допустимые пределы и выдача соответствующих сигналов.
- Выдача дополнительных сигналов при обнаружении остановки вращения контролируемого

¹ Ведущий инженер-схемотехник.

механизма.

- Определение направления вращения контролируемого механизма и выдача соответствующих сигналов.
- Обеспечение питания первичных преобразователей, если принцип их действия требует подачи внешнего питания. В отдельных случаях источник питания может быть выполнен в виде самостоятельного блока.
- Дополнительные функции. Например, математическая обработка результатов измерений, подсчёт суммарного числа оборотов и т.д.

2. Тахометрические преобразователи

Перечислим основные типы тахометрических преобразователей, используемых в судовой практике, а также кратко рассмотрим их достоинства, недостатки и особенности применения.

По принципу действия тахометрические преобразователи можно разделить на две группы: генераторные преобразователи и частотно-импульсные. Рассмотрим по отдельности каждую категорию:

2.1. Генераторные тахометрические преобразователи

Под «генераторными» будем подразумевать устройства, которые при вращении вала контролируемого механизма вырабатывают ЭДС, пропорциональную скорости его вращения. В данную группу преобразователей входят устройства, перечисленные далее.

2.1.1. Тахогенераторы

Исторически являются одним из первых преобразователей скорости вращения в электрический сигнал, однако широко применяются до сих пор. В основном – на устаревших судах. По сути, они представляют собой маломощные генераторы постоянного или переменного тока. Поскольку, с одной стороны, от измерительных преобразователей не требуется высокая нагрузочная способность, а с другой – требуется высокая надёжность, автономность и простота конструкции, чаще всего они выполняются с возбуждением постоянным магнитом, однако могут применяться и обмотки внешнего возбуждения. Главное отличие их от силовых электрических машин – один или несколько параметров вырабатываемой ЭДС являются функцией измеряемой угловой скорости вращения ротора. Нормирование может производиться в виде кривой передаточной характеристики, приводимой в паспорте, РЭ или иной документации на прибор. Для снижения погрешности преобразования, а также упрощения применения,



Рисунок 1 - МЭД-8/30

тахогенераторы чаще всего выполняются в виде машин постоянного тока. При этом функцией угловой скорости является уровень выходного напряжения. Поскольку конструкция тахогенераторов, как правило, проектируется таким образом, что передаточная характеристика имеет линейный участок в определённом интервале скоростей вращения ротора, возможно упрощённое нормирование в виде таблицы с несколькими значениями ЭДС в определённых точках в данном интервале.

Достоинства тахогенераторов: не требуют дополнительного питания (в случае возбуждения постоянным магнитом), просты в применении, для приборов постоянного тока – возможность определения направления вращения (согласно полярности формируемой ЭДС).

Недостатки: необходимость механического соединения ротора прибора с контролируемым механизмом, ограниченный диапазон измерений и принципиальная невозможность работы на очень низких скоростях вращения (единицы доли об/мин), уход

характеристик прибора с течением времени вследствие механического износа деталей и изменения характеристик постоянного магнита.

В качестве примера рассмотрим тахогенератор МЭТ-8/30. Согласно паспортным данным, он используется в комплекте с прибором тахометр К16 для измерений частоты и разности частот вращения при синхронизации двух вращающихся валов, а также для указания направления вращения гребных валов судов. Диапазон измерений – до 1500 об/мин. Номинальное напряжение до 30 В на максимальной скорости вращения. Выходной ток – до 0,03 А, выходная мощность – до 0,9 Вт. Допускаемые отклонения выходного напряжения $\pm 0,35\%$ от номинального. Температура окружающего воздуха – от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность – до 98 %. Передаточная характеристика нормируется в нескольких точках, приведённых в таблице 1. Вид передаточной характеристики – линейная.

Таблица 1 - Передаточная характеристика тахогенератора МЭТ-8/30

Скорость вращения, об/мин	500	700	900	1100	1300	1500
Напряжение на щетках, В	10	14	18	22	26	30

2.1.2. Индукционные тахометрические преобразователи

Являются дальнейшим усовершенствованием предыдущего класса приборов с целью снижения механических деталей, упрощения конструкции и установки на объекте. Принцип действия данных преобразователей проиллюстрирован на рисунке 2.

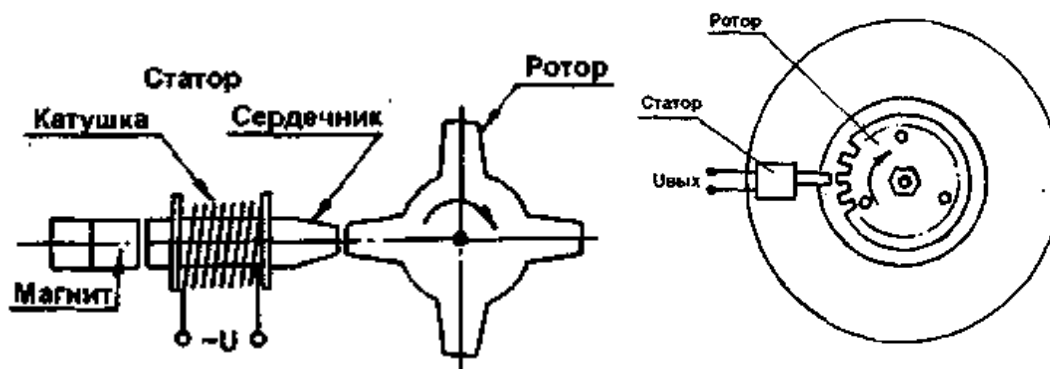


Рисунок 2 - Индукционный тахометрический преобразователь

Преобразователь представляет собой катушку индуктивности, установленную на сердечнике, в качестве которого используется постоянный магнит. На валу контролируемого механизма устанавливается зубчатое колесо, выполненное из материала с высокой магнитной проницаемостью (как правило, обычная сталь). При вращении вала зубцы проходят мимо торца магнита, периодически изменяя магнитный поток в контуре. В катушке наводится переменная ЭДС, частота которой равна частоте следования зубьев, а амплитуда пропорциональна скорости вращения. В целом достоинства и недостатки повторяют перечисленные для тахогенераторов, однако имеются следующие особенности:

Поскольку в самих преобразователях отсутствуют движущиеся элементы, они значительно надёжнее предыдущих. Однако для работы требуется установка зубчатого колеса непосредственно на контролируемом валу, либо на промежуточных элементах. В одних случаях это облегчает монтаж преобразователей, в других – усложняет.

Магнитный поток в преобразователе замыкается через внешний элемент – зубчатое колесо. Как следствие – требуется высокая точность установки зазора между торцом преобразователя и колесом. Величина рабочего зазора между датчиком и колесом составляет очень малую величину (как правило, не более 2 мм. Чаще – порядка 1 мм), что создаёт дополнительные трудности при разработке конструкции крепления и монтаже. Определённые требования также накладываются на точность изготовления колеса и нарезаемых на нём зубьев (рекомендуемый профиль зубьев приводится в документации на конкретную модель преобразователя).

В качестве примера можно назвать преобразователи производства АО «Приборостроительный завод «Вибратор» типа Г113 (входит в состав измерительного комплекса К1803), ФП1891, ФП1895 и др.



Рисунок 3 - Примеры индукционных тахометрических преобразователей (слева направо) – Г113, ФП1891, ФП1895

2.2. Частотно-импульсные преобразователи

Устранение значительной зависимости характеристики преобразования от точности установки и работы механической части достигается с использованием иного принципа измерения, в котором выходным параметром является частота периодического сигнала, зависящая от скорости вращения контролируемого механизма. При этом иные свойства сигнала, как правило, не учитываются, и зависимость результатов измерений от них стремятся свести к минимуму. В настоящее время для измерения частоты сигнала и пересчёта её в скорость вращения широко применяются средства цифровой схемотехники, что также повышает точность и стабильность измерений.

В данном методе могут использоваться тахогенераторы с выходом по переменному току и индукционные преобразователи. В последнем случае скорость вращения однозначно связана с частотой сигнала следующей формулой:

$$\omega = \frac{f \cdot N}{60}, \quad (1)$$

где ω – скорость вращения об/мин, f – частота сигнала преобразователя, N – число зубьев колеса.

В качестве примера подобных решений можно назвать, например, тахометрические комплексы К1803 производства АО «Вибратор».

Существенным недостатком данного подхода является зависимость у перечисленных датчиков амплитуды выходного сигнала от частоты вращения, что в данном случае является негативным фактором (При изменении скорости вращения от минимального значения до максимального амплитуда сигнала может изменяться от десятков мВ до десятков В!). Это вынуждает усложнять схемотехнику входных цепей вторичных преобразователей и снижает помехоустойчивость системы. Кроме того, измерение низких скоростей вращения по-прежнему невозможно.

В связи с этим были разработаны устройства, специально предназначенные для применения частотного метода измерений, и при этом лишённые недостатков, свойственных генераторным преобразователям. Как правило, эти преобразователи являются активными (выполненными с использованием активных электронных компонентов), а, следовательно, требуют для работы подачи внешнего питания.

2.2.1. Ограничения типовых тахометрических преобразователей, связанные со спецификой применения

Кратко отметим принципы построения преобразователей, которые широко используются, но вследствие тех или иных причин редко применяются в практике судостроения. К ним относятся широко распространённые оптические преобразователи, в которых поток оптического излучения (в видимом либо ИК диапазоне) модулируется прерывателем либо рефлектором, механически связанным с валом контролируемого механизма. Обеспечивая превосходные характеристики по величине рабочего зазора (при использовании лазерных излучателей – единицы метров и более) и стабильности выходного сигнала эти преобразователи функционируют лишь при обеспечении надлежащей прозрачности оптического канала. В судостроении же отмеченное требование часто невыполнимо вследствие жёстких условий эксплуатации – присутствие насыщенных паров, масла, копоти и т.д. Иногда преобразователь должен функционировать в полностью непрозрачной среде. Например, с погружением в масло рабочей части.

Преобразователи, работающие на емкостном принципе, формируют импульсный сигнал при приближении к их чувствительной части металлического объекта, и как следствие, изменении диэлектрической проницаемости среды. Имеют высокую чувствительность (рабочий зазор) при регистрации крупных объектов, поэтому часто используются на производстве в конвейерных линиях. Потенциально возможно их применение с зубчатым колесом, как в случае с индукционным датчиком. Однако практические требования судостроения на размер зубьев колеса значительно ограничивают рабочий зазор подходящих преобразователей, что в сочетании с рядом других факторов (в частности, их ограниченного быстродействия) делает их применение нецелесообразным.

Для измерения скорости вращения потенциально могут также применяться энкодеры – функционально законченные устройства, формирующие импульсные последовательности при вращении их подвижной части. За счёт использования герметичного корпуса они могут быть построены на любом принципе действия, в том числе на оптическом, что определяет высокую стабильность и точность формируемого сигнала. Недостатком является необходимость механического соединения подвижной части энкодера и контролируемого механизма, а также подверженность износу механической части.

2.2.2. Преобразователи на срыве генерации

Структурная схема такого преобразователя приведена на рисунке 4.

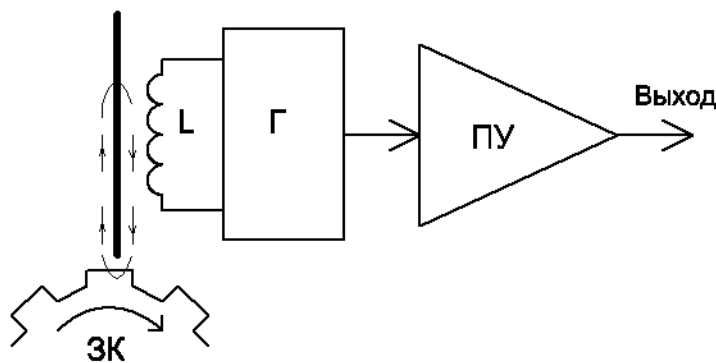


Рисунок 4 - Преобразователь на срыве генерации

Основой преобразователя является маломощный LC-автогенератор Г, работающий в режиме, близком к порогу поддержания генерации. Катушка индуктивности с сердечником L входит в состав резонансного контура автогенератора. Сердечник катушки замыкает магнитный поток через внешнюю среду, в которую вводится вращающееся зубчатое колесо ЗК. В момент пересечения зубьями колеса переменного магнитного потока катушки, в них наводятся вихревые токи, создающие дополнительное затухание в контуре. Колебания в LC-генераторе срываются. В моменты выхода зубьев из магнитного потока колебания вновь возобновляются. Наличие и отсутствие колебаний регистрируется пороговым устройством ПУ, формирующим итоговый выходной сигнал.

Достоинства датчиков на срыве генерации: возможность регистрации сколь угодно медленной скорости вращения, вплоть до полной остановки, возможность изготовления зубчатого колеса из немагнитных металлов (например, бронзы, латуни).

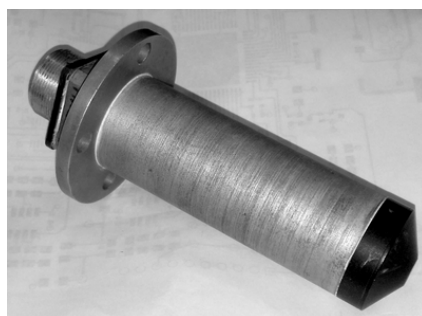


Рисунок 5 - ФП1892.1

Недостатки – ограниченная максимальная скорость вращения, что связано со временем запуска автогенератора после срыва колебаний (как правило, частота выдаваемого сигнала не превышает 2 кГц), малая величина допустимого зазора между зубчатым колесом (как правило, не более 1 мм), низкая стабильность при изменении температуры окружающей среды (в настоящее время отчасти компенсируется схемотехнически).

В качестве примера данного типа преобразователей можно назвать выпускавшийся АО «Вибратор» ФП1892.1.

2.2.3. Преобразователи на эффекте Холла

Как было отмечено выше, в индукционных преобразователях для фиксации изменения магнитного потока постоянного магнита используется катушка индуктивности. Однако современные полупроводниковые технологии позволяют выполнить данную операцию и иными методами. Широко применяемым методом в настоящее время является использование элементов Холла – специальных полупроводниковых приборов, формирующих на выходе разность потенциалов, пропорциональную проходящему сквозь толщу полупроводника значению магнитного потока. Элементы Холла имеют ряд преимуществ перед другими видами чувствительных элементов, такие как очень малые габаритные размеры, высокая чувствительность, способность работать в широком диапазоне частот модуляции магнитного поля (от 0 до десятков кГц). В простейшем случае структурная схема преобразователя на эффекте Холла представлена на рисунке 6.

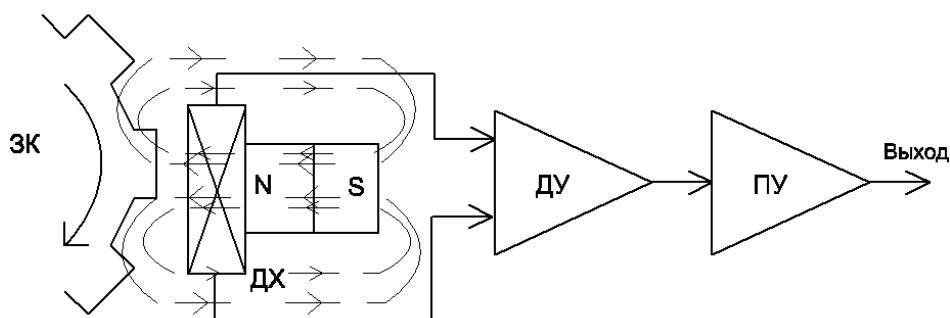


Рисунок 6 - Преобразователь на эффекте Холла

Элемент Холла ДХ с установленным на нём магнитом размещается напротив торца зубчатого колеса, сделанного из материала с высокой магнитной проницаемостью. При приближении зубца к элементу Холла, плотность магнитного потока через элемент повышается, а следовательно, растёт уровень его выходной ЭДС. Сигнал элемента Холла усиливается дифференциальным усилителем ДУ и поступает на вход порогового устройства ПУ. Порог его срабатывания выбирается равным промежуточному значению сигнала между состоянием, когда напротив элемента Холла находится зуб, и когда – впадина. Однако на практике подобная схема не используется. Это связано с тем, что напряжённость магнитного потока имеет значительную зависимость от величины рабочего зазора, материала колеса, собственных свойств постоянного магнита и т.д. Таким образом, от этих факторов будет зависеть и уровень сигнала для зуба и впадины. А значит, при установке на объекте каждый раз приходилось бы выполнять тонкую настройку порога срабатывания ПУ. Обеспечение стабильности настройки с течением времени также представляло бы серьёзную проблему.

Практическая применяемая структурная схема преобразователя Холла представлена на рисунке 7.

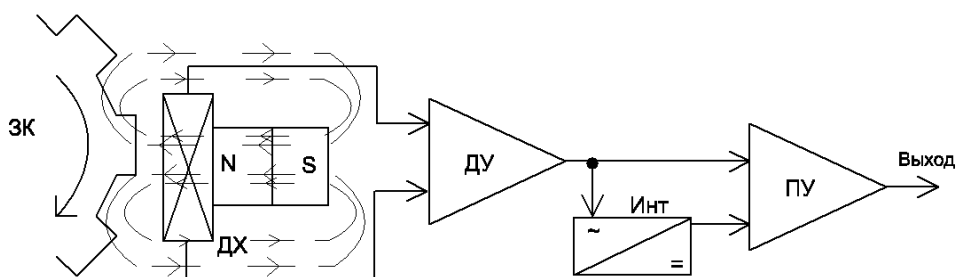


Рисунок 7 - Улучшенный преобразователь на эффекте Холла

Отличие от предыдущей схемы заключается в использовании плавающего порога срабатывания ПУ, автоматически подстраивающегося до требуемого значения при вращении колеса. Порог формируется интегрирующим устройством, выделяющим среднее значение сигнала.



Рисунок 8 - Примеры преобразователей на эффекте Холла

Необходимость в настройке под конкретные условия применения отпадает.

Достоинства преобразователей на эффекте Холла: высокая стабильность параметров с течением времени, высокое быстродействие (формируют частоты до десятков кГц), не критичность к профилю

нарезки зубьев. Выходным сигналом таких датчиков обычно является либо дискретные логические уровни, либо выход «открытый коллектор», что упрощает подключение к внешней системе и повышает помехоустойчивость канала связи.

Недостатком рассмотренного выше принципа является ограничение по минимальной частоте выходного сигнала (минимальной скорости вращения, которую преобразователь способен зарегистрировать). Это ограничение определяется постоянной времени интегратора, которая выбирается из компромиссных соображений – исходя из минимально допустимой частоты выходного сигнала и из максимального времени готовности устройства. Максимальный зазор между колесом серийно выпускаемых преобразователей, как правило, также составляет не более 2 мм, что связано с необходимостью обеспечения устойчивой работы интегратора.

По такому принципу строится большинство современных тахометрических преобразователей, представленных на рынке (см. рисунок 8).

2.2.4. Критерии устойчивого функционирования тахометрических преобразователей

В ходе исследовательских работ, проводимых на АО «Вибратор», эмпирическим путём был определён ряд критериев для преобразователей, работающих с зубчатым колесом, которые определяют их принципиальную возможность устойчивой работы в части способности различения зуба и впадины колеса. Рассмотрим общий эскиз преобразователя, выполненного по любому из описанных выше принципу действия. Эскиз представлен на рисунке 9.

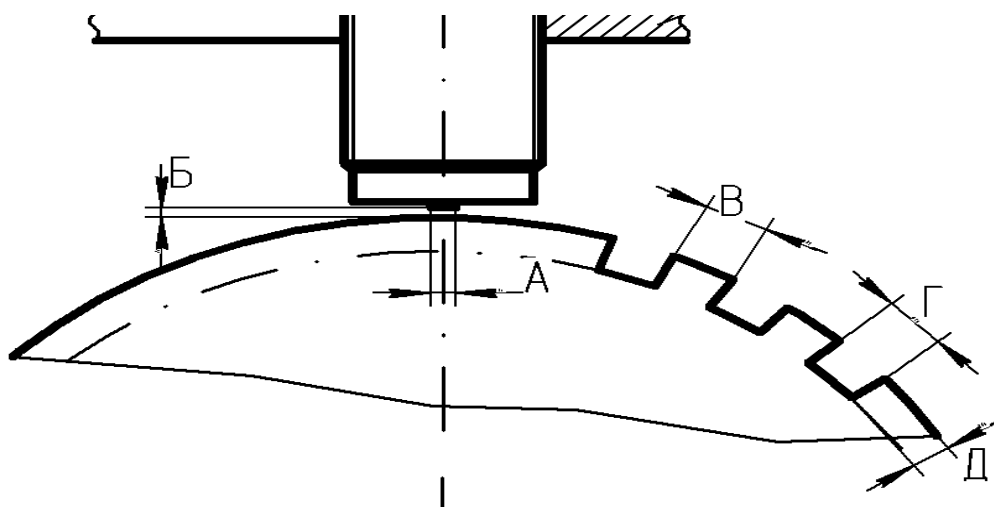


Рисунок 9 - Эскиз установки тахометрического преобразователя

Допустим, преобразователь имеет чувствительную зону, имеющую согласно рисунку диаметр А. Тогда для обеспечения потенциальной возможности различения зубьев колеса, а следовательно, и формирования выходного сигнала, должны быть обеспечены следующие механические требования:

- Ширина зубьев В и впадин Г должны быть близки по значению, либо превышать диаметр чувствительной зоны А.
- Величина рабочего зазора Б должна быть не более диаметра чувствительной зоны А.
- Глубина впадины Д должна быть не менее удвоенной величины рабочего зазора Б.

Перечисленные факторы накладывают серьезные ограничения на профиль зубьев колеса и, как следствие, его минимальные геометрические размеры, а также на способ монтажа преобразователей на объекте.

2.2.5. Дифференциальный преобразователь на эффекте Холла

Ограничения практического применения для преобразователей на эффекте Холла, в том числе описанные выше, возможно преодолеть, используя современные достижения в области полупроводниковых технологий. Для этого, вместо применения одиночного датчика, можно использовать дифференциальную схему, представленную на рисунке 10.

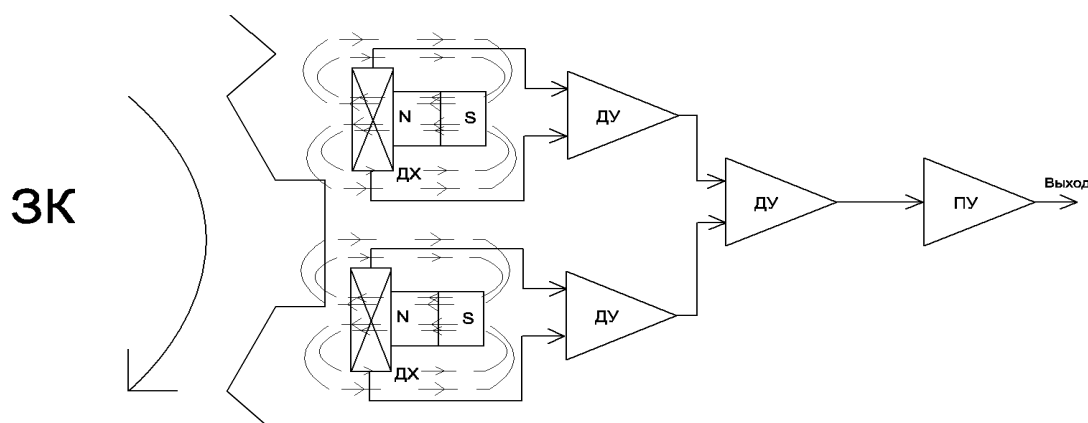


Рисунок 10 - Дифференциальный преобразователь Холла

В данном случае для компенсации влияния случайных факторов используется два датчика Холла, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга. При этом случайные факторы, определяющие средний уровень магнитного потока, воздействуют одинаково на оба датчика. Таким образом, при отсутствии зубчатого колеса сигналы с обоих датчиков были бы одинаковыми. Зуб колеса, периодически проходя мимо датчиков, нарушает эту симметрию, усиливая магнитный поток сначала в первом датчике, а затем – во втором. Разность сигналов выделяется дифференциальным усилителем и используется для формирования выходного сигнала.

Описанный тип преобразователей является наиболее перспективным для применения в судовом оборудовании в настоящее время. Сочетая в себе все достоинства ранее описанных приборов на эффекте Холла, он лишён большинства их недостатков. В частности, рабочий диапазон по частоте может начинаться с нуля (на практике его ограничивают величиной по крайней мере в доли Гц для повышения помехоустойчивости), а максимальная величина рабочего зазора может составлять 3 мм и более. При этом сама величина зазора не критична – преобразователь способен устойчиво работать при любом зазоре вплоть до максимального значения.

Особенностью применения указанных преобразователей является то, что для их работы требуется правильная установка положения в пространстве: оба элемента Холла должны находиться в плоскости зубчатого колеса. Однако учитывая большой запас по рабочему зазору, а также при использовании соответствующей маркировке на корпусе прибора, данное требование легко выполнимо.

3. Тахометрический комплекс МТК

Данный комплекс был разработан АО «Вибратор» в 2013 году и был запущен в серийное производство. Тахометрический комплекс разрабатывался на современной элементной базе с широким использованием микропроцессорной техники. Набор функций, заложенный в МТК, позволяет решить с его помощью практически все типовые задачи тахометрии в судостроительной отрасли, для которых ранее требовалось значительное количество разнотипного оборудования.

Тахометрический комплекс МТК, в зависимости от модификации, выполняет следующие функции:

- измерение частоты вращения вала с возможностью определения направления его вращения. Диапазон измерений – стандартные значения до 15000 об/мин, либо по заказу.
- подсчёт общего числа оборотов вала с сохранением результатов в энергонезависимой памяти – до 99999999 об. Возможны различные режимы работы счётчика оборотов.
- сигнализацию об остановке вала;
- сигнализацию о достижении заданных частот вращения вала (от 0 до 2 значений);
- передачу гальванически развязанных частотных (импульсы, совпадающие по частоте с сигналом первичного преобразователя) сигналов и аналоговых сигналов тока или напряжения, пропорциональных частоте вращения;
- передачу по интерфейсу RS-485 информации об измеренных параметрах, техническом состоянии МТК, о достижении заданных уставок;
- отображение на одном, двух или трех постах управления в цифровом и дискретно-аналоговом виде частоты и направления вращения вала, а также общего числа оборотов.

Внешний вид полного комплекта МТК, включающего в себя первичный преобразователь, вторичный преобразователь, а также показывающие приборы приведён на рисунке 11, а типовая схема соединения его блоков – на рисунке 12. Комплекс в зависимости от исполнения может содержать от 2 до 6 блоков –

первичный преобразователь (МТК-ПП), вторичный преобразователь (МТК-ВП), от 1 до 4 блоков индикации (МТК-БИ), от 1 до 4 счётчиков оборотов (МТК-СО).

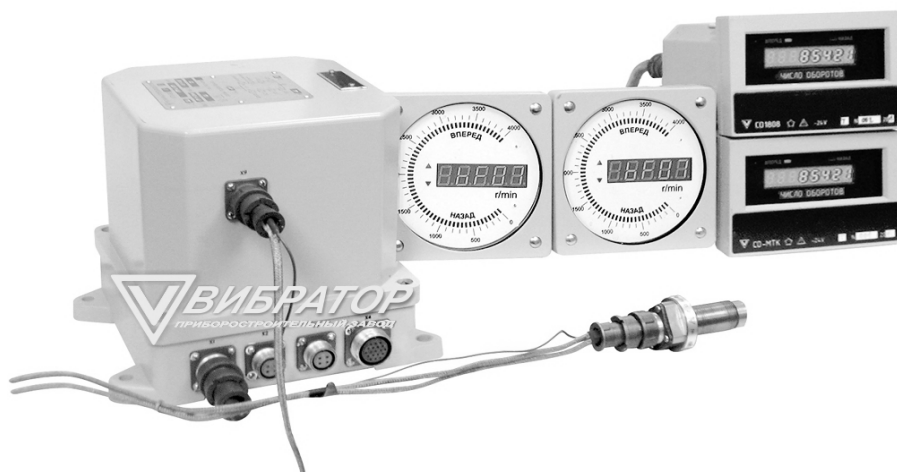


Рисунок 11 - Внешний вид комплекса МТК

Одной из ключевых особенностей МТК является применение высокоэффективных первичных преобразователей МТК-ПП, построенных по дифференциальной схеме Холла. Это впервые в отрасли позволило обеспечить работы с широким зазором между зубчатым колесом (согласно ТУ, 3 ± 1 мм) при сохранении широкого диапазона рабочих частот (порядка от 0,2 Гц до 7,5 кГц).

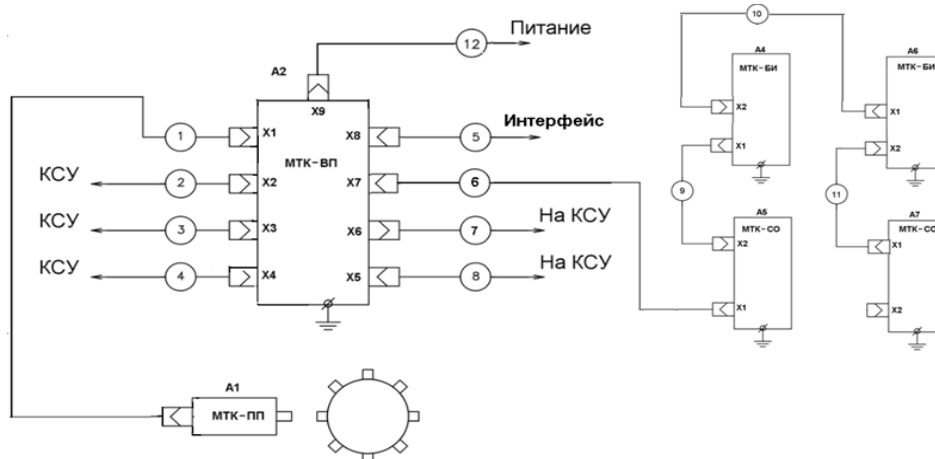


Рисунок 12 - Типовая схема соединений МТК



Рисунок 13 - МТК-ПП

Кроме того ввиду высокой компактности элементной базы, удалось разместить в одном корпусе сразу два преобразователя при сохранении габаритных размеров типового индукционного преобразователя. Таким образом, для определения направления не требуется устанавливать на объекте два отдельных модуля. Ещё одной особенностью является использование в качестве выходного сигнала уровней тока (4...20 мА), а не напряжения. Это позволило достаточно просто реализовать контроль целостности линии связи между первичным и вторичным преобразователями по току, протекающему в замкнутом контуре. Значение тока, выходящее за пределы номинальных значений – сигнал о неисправности в линии (обрыве, либо о коротком замыкании), либо о неисправности первичного преобразователя.

Благодаря защищённому исполнению корпуса IP57 и рабочему диапазону температур от -10 до +80 °С МТК-ПП может применяться в тяжёлых условиях эксплуатации. Например, с погружением рабочей части в горячую воду и т.д.

Вторичный преобразователь МТК-ВП – главный исполнительный блок комплекса. Он выполняет все функции по выполнению операций измерения, обработке результатов и формированию выходных сигналов. Благодаря использованию современной элементной базы и цифровых методов обработки сигналов обеспечивается высокая точность измерений: по цифровой шкале скорости вращения – не хуже +/- 0,15 %; по дискретно-аналоговой шкале – +/- 1,5 %; по аналоговым выходам – не хуже +/- 0,25 %; по срабатыванию сигнализации – не хуже +/- 0,15 %; для счетчика оборотов комплекса – не хуже +/- 0,1 %.

Выходные сигналы о достижении заданных значений скорости вращения, об остановке вала контролируемого механизма, а также о направлении вращения выдаются при помощи релейных контактов. Имеются также два выхода аналоговых сигналов, пропорциональных мгновенному значению скорости вращения. Это даёт возможность применения МТК для модернизации существующих систем с аналоговой обработкой сигналов.

Помимо указанных выходных сигналов, наличие цифрового интерфейса позволяет осуществлять непосредственное подключение МТК к современным системам, построенным на основе микропроцессоров и ЭВМ. Интерфейс RS-485 обеспечивает простое и надёжное подключение, он присутствует практически в каждой современной системе сбора и обработки данных.

Другой особенностью МТК-ВП по сравнению тахометрическими комплексами аналогичного назначения является обеспечение полной работоспособности МТК при полном пропадании напряжения питания на время не менее 1 с. МТК-ВП содержит в своём составе источник бесперебойного питания, обеспечивающий работу всей системы, включая первичный преобразователь и показывающие приборы, в течение указанного времени. Напряжение питания МТК-ВП в зависимости от исполнения – 220 В частотой 50 или 400 Гц, либо 27 В постоянного тока. Потребляемая мощность комплекса, в зависимости от исполнения, составляет от 10 до 30 Вт.

Показывающие приборы МТК представлены двумя типами: блок, отображающий скорость вращения МТК-БИ, и блок, отображающий подсчитанное число оборотов МТК-СО. Ключевые особенности блоков:

– Не требуется дополнительный источник питания. Блоки получают питание по МТК-ВП.

– Независимость показаний от канала связи. Вся обработка полностью выполняется в МТК-ВП. Показывающие приборы лишь получают данные по цифровому интерфейсу. Благодаря этому исключается возможность искажения показаний из-за помех, наводимых на соединительный кабель. Длина кабеля согласно ТУ допускается до 600 м.

– Показывающие приборы соединяются последовательно. Не требуется применение каких-либо распределительных коробок для подключения всех показывающих приборов к одному вторичному преобразователю.

Заключение

В данной работе были рассмотрены различные виды тахометрических преобразователей, применяемых в судостроении. Рассмотрены достоинства и недостатки каждого из видов, затронуты особенности их применения в реальных условиях. В качестве примера наиболее перспективного технического решения в данном направлении был рассмотрен дифференциальный преобразователь на эффекте Холла и тахометрический комплекс МТК, использующий их в своём составе.

Литература

1. ГОСТ 18303-72 Тахометры. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 8 с.
2. ГОСТ 21339-82 Тахометры. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 24 с.
3. Раннев, Г. Г., Тарасенко, А. П. Методы и средства измерений. Учебник для вузов. – М.: Издательский центр "Академия", 2004. – 336 с.
4. Спектор, С. А. Электрические измерения физических величин: Методы измерений: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 318 с.

5. Савостьянов, В. П., Филатова, Г. А., Филатов, В. В. Расчет и конструирование деталей аппаратуры САУ. – М.: Машиностроение, 1982. – 219 с.
6. Шалимова, К. В. Физика полупроводников. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 390 с.
7. ЗПА.492.025ГО. Преобразователи первичные тахометрические ФП1891 и ФП1892. Техническое описание и инструкция по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vbrspb.ru/files/20160116-125631_103210159.pdf.
8. ЗПА.492.018РЭ. Тахометры К1803. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vbrspb.ru/files/20140902-103426_9580965.pdf.
9. ЗПА.492.203РЭ. Многофункциональный тахометрический комплекс МТК. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://vbrspb.ru/files/20141021-135144_1760690490.pdf.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТОЧНОСТИ

Ю. В. Савельев, В. М. Гнидюк, В. М. Савельева, М. Н. Абашин

АО «НПП «Радар ммс», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: savelev_juv@radar-mms.com

Аннотация

Ключевые слова: датчик, пьезорезонансный, прецизионный, давление

Представлены результаты разработки прецизионных датчиков гидростатического и воздушного давления, принцип действия которых основан на изменении под воздействием давления измеряемой среды резонансной частоты колебаний высокочастотных микрокамертонных кварцевых резонаторов. Приведены диаграммы погрешностей в диапазоне рабочих температур, показывающие, что погрешность датчиков воздушного давления не превышает $\pm 0,02\%$, а погрешность датчиков гидростатического давления не превышает $\pm 0,08\%$. Исследованы возможности дальнейшего повышения точности измерений датчиков гидростатического давления до $\pm 0,02\%$.

Введение

Развитие современной техники, включая область судостроения, предопределило необходимость повышения качества ее функционирования, которое существенным образом зависит от применяемых средств получения первичной информации – датчиков. Так, в области судостроения применяется большое количество датчиков давления различного назначения. Среди характеристик датчиков давления наиболее важны такие характеристики, как основная погрешность измерения; точность измерений на начальном участке диапазона; быстродействие; величина дополнительной температурной погрешности.

Тенденция закупки импортных датчиков давления в последние десятилетия привела к сокращению отечественных разработок точных датчиков давления. В настоящее время для использования в судостроении и океанографии в основном применяются датчики зарубежных производителей. Выпускаемая отечественной промышленностью в интересах судостроения номенклатура датчиков давления обладает основной погрешностью $\pm 0,25\%$ и более, а также дополнительной температурной погрешностью, в ряде случаев достигающей значения основной погрешности.

Принимая во внимание растущую потребность в точных датчиках отечественного производства, АО «НПП «Радар ммс» стало развивать направление по разработке высокоточных датчиков абсолютного давления специализированного назначения как для измерений в морской воде, так и в воздухе. Был разработан ряд прецизионных датчиков гидростатического и воздушного давления, и на основе полученных результатов определены возможности дальнейшего повышения их точности измерений.

Текст доклада

Анализ имеющихся принципов измерения давления по виду преобразования давления в электрический сигнал показывает, что в данный момент наименьшей погрешностью измерения обладают изделия с пьезорезонансными чувствительными элементами, выполненными из кварца на базе микромашиных технологий [1].

Их главными достоинствами являются:

- высокая чувствительность;
- отсутствие гистерезиса;
- высокая кратковременная и долговременная стабильность характеристик;
- простота компенсации влияния температуры.

В соответствии с этим разрабатываемые прецизионные датчики давления основаны на изменении под воздействием давления измеряемой среды резонансной частоты колебаний высокочастотных микрокамертонных кварцевых резонаторов, обладающих высокой разрешающей способностью до тысячных долей процента от верхнего предела измерений (ВПИ).

Сконструированные датчики характеризуются минимальными дрейфом «нуля» и гистерезисом, низкой чувствительностью к ударным и вибрационным нагрузкам [2]. Для алгоритмической компенсации влияния температуры в рабочем диапазоне температур в конструкции датчиков применены кварцевые термочувствительные элементы, что позволяет при необходимости выводить дополнительно данные по температуре с разрешением $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Резонансные чувствительные элементы не требуют применения аналого-цифрового преобразования в устройствах обработки и преобразования сигналов и дают возможность осуществлять непосредственный подсчет частоты колебаний. Это позволяет сохранить высокие метрологические характеристики, присущие кварцевым резонаторам, а также устранить такие традиционные проблемы тензодатчиков, как временную и температурную нестабильность аналоговых цепей измерительного усилителя и АЦП, необходимость подстройки нуля.

Развитие современных отечественных микроконтроллеров, в том числе на архитектуре ARM Cortex, позволило отказаться от применения импортных комплектующих и достичь обновления информации на выходном цифровом интерфейсе датчика с периодом от 100 мс без потери точности. Вся математическая обработка частотных данных, полученных с чувствительных элементов давления и температуры, выполняется микроконтроллером и заключается в расчете двухфакторного полинома второй степени.

Таким образом, благодаря примененным схемотехническим и конструктивно-технологическим решениям по корпусированию резонаторов удалось разработать широкий спектр различных прецизионных датчиков давления специализированного применения, основными преимуществами которых являются:

- высокие точностные характеристики во всем диапазоне рабочих температур и во всем диапазоне измерений давлений, включая его начальный участок: погрешность измерения датчиков гидростатического давления до $\pm 0,08$ % от ВПИ, погрешность измерения датчиков воздушного давления до $\pm 0,02$ % от ВПИ [3], [4];

- высокая разрешающая способность;

- высокая долговременная стабильность характеристик;

- цифровой выходной сигнал.

Так, для применения в контрольно-измерительных системах были разработаны и серийно производятся датчики давления ПДС-А на отечественной элементной базе [5].

Фотография трех конструкций датчиков давления ПДС-А приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Датчики давления ПДС-А и свидетельство об утверждении типа СИ

Датчикам давления ПДС-А присвоен тип средства измерений. В настоящее время ведутся работы по их совершенствованию в части повышения быстродействия до 200 мс, что позволит значительно расширить их область применения.

В интересах морской робототехники, а также для судов с динамическим принципом поддержания была разработана аппаратура прецизионного контроля давления АПКД-1 на базе датчиков давления ПДС-1 и ПДС-2, подключаемых к блоку контроля БК-1. Датчики выполнены в одинаковом конструктиве и отличаются лишь примененной элементной базой: датчик ПДС-1 выполнен на отечественной элементной базе, датчик ПДС-2 выполнен на импортной элементной базе. Датчики давления герметичны, оснащены герметичным соединителем, комплектуются кабелем длиной 10 м (при заказе длина кабеля может быть изменена) и рассчитаны на измерение давления воздуха и морской воды. Один блок контроля позволяет подключить до 20 датчиков одним кабелем с выводом информации на дисплей. На дисплее отображается одновременно информация по давлению от четырех датчиков с поочередным опросом всех подключенных датчиков. При внешнем питании датчиков давления к блоку контроля можно подключить до 31 датчика. Также в аппаратуре предусмотрено комплексирование с датчиком атмосферного давления ДАДС-1 для компенсации влияния давления атмосферы при измерении уровней воды, для чего в блоке контроля предусмотрен специальный соединитель.

Фотография аппаратуры прецизионного контроля давления АПКД-1 приведена на рисунке 2. На рисунке 3 приведена фотография датчиков давления ПДС-1 с установленным фильтром, входящим в комплект поставки, для измерения порового давления воды в грунте.



Рисунок 2 - Аппаратура прецизионного контроля давления АПКД-1



Рисунок 3 - Датчик давления ПДС-1 с фильтром

Технические характеристики ПДС-1 и ПДС-2 приведены в таблице 1. Технические параметры блока контроля БК-1 приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Технические характеристики датчиков давления ПДС-1 и ПДС-2

Наименование параметра	ПДС-1	ПДС-2
Верхний предел измеряемых абсолютных давлений (ВПИ), МПа	0,25; 0,6; 1,0; 2,5	
Нижний предел измеряемых давлений, МПа	0,06	
Предельно допустимое давление, % от ВПИ	125	
Пределы допускаемой приведенной погрешности измерений в диапазоне рабочих температур, %, не более	± 0,08	
Разрешающая способность, % от ВПИ, не более	0,008	
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 5 до плюс 40	
- морская вода	от 0 до плюс 40	
- пресная вода		
Напряжение питания, В	5 ^{+0,5}	6,5
Ток потребления, мА, не более	145	50
Интерфейс выходного сигнала	RS-485	
Период опроса, мс, не менее	200	600
Габаритные размеры, мм	Ø48×148	
Масса, кг, не более	0,6	
Присоединительный размер к магистрали давления	M20×1,5	

Таблица 2 - Технические характеристики блока контроля БК-1

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 5 до 40
Напряжение питания, В	27±5
<i>Примечание: БК-1 обеспечивает питанием до 20 подключенных ПДС</i>	
Ток потребления (без ПДС), не более, А	0,2
Габаритные размеры, мм	130×119,3×46,4
Масса, кг, не более	0,35

Датчики давления применяются в составе систем необитаемых подводных аппаратов для измерения забортного давления на глубине их погружения. Успешно проведены натурные испытания датчиков давления на глайдере. Кроме того, датчики давления могут применяться как отдельно, так и в составе аппаратуры АПКД-1 на судах с воздушной каверной для измерения распределения полей давления в каверне. Еще одной областью применения аппаратуры прецизионного контроля давления АПКД-1 является измерение датчиками уровня воды в емкостях (баках, цистернах) с использованием данных датчика атмосферного давления, а также в качестве пьезометров для контроля порового давления воды в грунте.

На базе датчиков давления ПДС-1 были разработаны и изготовлены макеты датчиков давления ДДКС-Г-3 и ДДКС-Г-10, обеспечивающие выдачу значений давления и температуры. Фотография макета датчика давления ДДКС-Г-3 приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 - Макет датчика давления ДДКС-Г-3

Технические характеристики ДДКС-Г-3 и ДДКС-Г-10 приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Технические характеристики макетов датчиков давления ДДКС-Г-3 и ДДКС-Г-10

Наименование параметра	ДДКС-Г-3	ДДКС-Г-10
Диапазон измеряемых давлений, МПа	от 0,11 до 3	от 0,11 до 10
Предельно допустимое давление, МПа	3,75	12,5
Приведенная погрешность определения давления, % (от ВПИ), не более	± 0,08	± 0,08
Разрешающая способность по давлению, % (от ВПИ), не более	0,008	0,008
Диапазон измеряемых температур, °С	от минус 4 до плюс 35	от минус 4 до плюс 35
Абсолютная погрешность определения температуры, °С	0,05	0,05
Разрешающая способность по температуре, °С, не более	0,02	0,02
Периодичность выдачи данных, не более, с	0,2	0,2
Тип интерфейса	RS-485	RS-485
Напряжение питания, В	5 ^{+0,5}	5 ^{+0,5}
Габаритные размеры, мм	Ø48×117	Ø48×127
Масса, кг, не более	0,50	0,52
Присоединительный размер к магистрали давления	M12×1,5	M20×1,5

Макет датчика давления ДДКС-Г-3 предназначен для применения в составе буксируемого необитаемого подводного аппарата. Макет датчика давления ДДКС-Г-10 предназначен для применения в составе автономного необитаемого подводного аппарата. Так как макеты датчиков давления устанавливаются в герметичный объем подводного аппарата, их электрическое соединение с аппаратурой осуществляется не через герметичный кабельный ввод, а через соединитель РСГС10.

Испытания макетов датчиков давления в ходе приемки заказчиком показали их высокие метрологические характеристики, не уступающие зарубежным аналогам, и в частности датчикам давления MiniIPS фирмы Valeport Limited (Великобритания).

Для измерения атмосферного давления разработан датчик ДАДС-1. В целях импортозамещения датчик выполнен на отечественной элементной базе. Фотография датчика атмосферного давления приведена на рисунке 5.



Рисунок 5 - Датчик атмосферного давления ДАДС-1

Технические характеристики ДАДС-1 приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические характеристики датчика атмосферного давления ДАДС-1

Наименование параметра	Значение параметра
Верхний предел измерения, гПа	1100
Нижний предел измерения, гПа	500
Пределы допускаемой погрешности измерения в диапазоне рабочих температур, гПа, не более	$\pm 0,5$
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 50 до плюс 60
Напряжение питания, В	9,5 ÷ 27,0
Ток потребления, мА, не более	145
Интерфейс выходного сигнала	RS-485
Период опроса, мс, не менее	200
Габаритные размеры	112×94×73
Масса, кг, не более	0,55

В настоящее время идет подготовка к проведению испытаний ДАДС-1 в целях утверждения типа средства измерений.

Датчик атмосферного давления ДАДС-1 предназначен для применения в метеостанциях системы мониторинга метеорологической обстановки в целях импортозамещения датчиков РТВ330 фирмы Vaisala (Финляндия). Также датчик может применяться в системах измерения уровня воды с погружными датчиками и датчиками давления (в том числе, ПДС-1 и ПДС-2) для компенсации влияния атмосферного давления.

Для измерения порового давления воды в грунте был разработан пьезометр ПКС-1. Пьезометр полностью герметичен и имеет кабельный ввод. Фотография пьезометра приведена на рисунке 6.



Рисунок 6 - Пьезометр ПКС-1

Технические характеристики ПКС-1 приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Технические характеристики пьезометра ПКС-1

Наименование параметра	Значение параметра
Верхний предел измеряемых давлений (ВПИ), МПа	1,0
Нижний предел измеряемых давлений, МПа	0,1
Предельное допускаемое давление, % (от ВПИ)	125
Приведённая погрешность измерений, % (от ВПИ), не более	$\pm 0,1$
Порог чувствительности, % от ВПИ, не более	0,01
Напряжение питания, В	от 6,0 до 6,5
Ток потребления, мА, не более	65
Диапазон рабочих температур, °С	от 0 до 60
Диапазон предельно допустимых температур, °С	от минус 10 до 60
Габаритные размеры (без учета кабеля), мм	Ø30×198

Пьезометры могут применяться для контроля давления и уровня грунтовых вод под фундаментами зданий и сооружений, опорами мостов, в грунте, окружающем тоннели, под дорожным и железнодорожным полотном, в грунтах оползнеопасных районов и береговой инфраструктуры.

В интересах метрологического обеспечения прецизионных датчиков давления были разработаны цифровые электронные модули давления МДКС. Фотография модулей давления приведена на рисунке 7.



Рисунок 7 - Цифровые электронные модули давления МДКС

Технические характеристики МДКС приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Технические характеристики цифровых электронных модулей давления МДКС

Наименование параметра	Значение параметра
Верхний предел измеряемых давлений (ВПИ), МПа	0,6; 1,0; 6,0
Нижний предел измеряемых давлений, МПа	0,05
Предельное допускаемое давление, % от ВПИ	125
Приведенная погрешность измерений, % от ВПИ, не более	$\pm 0,02$; $\pm 0,05$
Вариация выходного сигнала, % от ВПИ, не более	0,02; 0,05
Порог чувствительности, % от ВПИ, не более	0,005
Напряжение питания, В	от 6,0 до 6,5
Ток потребления, мА, не более	65
Диапазон рабочих температур, °С	от 5 до 50
Диапазон предельных температур, °С	от минус 20 до 70
Габаритные размеры, мм	$\varnothing 42 \times 112$

Модули МДКС предназначены для измерения задаваемого давления в составе калибровочно-поверочного оборудования, в том числе в переносных калибраторах давления.

Для измерения барометрического давления был разработан датчик давления кварцевый стабильный ДДКС-В-0,16. Фотография ДДКС-В-0,16 приведена на рисунке 8.



Рисунок 8 - Датчик давления кварцевый стабильный ДДКС-В-0,16

Технические характеристики ДДКС-В-0,16 приведены в таблице 7.

Таблица 7 - Технические характеристики датчика давления кварцевого стабильного ДДКС-В-0,16

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон измеряемых давлений, кПа	от 0,5 до 160
Основная приведенная погрешность измерений в диапазоне рабочих температур, %, не более	$\pm 0,02$
Порог чувствительности, Па, не более	10
Диапазон рабочих температур, °С	от минус 60 до 85
Напряжение питания, В	6,0±0,5
Ток потребления, мА, не более	5
Интерфейс выходного сигнала	КМОП
Выходной сигнал	частотный
Габаритные размеры	Ø56×106
Масса, кг, не более	0,3

Датчики успешно прошли испытания на стойкость к воздействию специальных факторов и натурные испытания на самолете.

Основной областью применения является измерение с высокой точностью давления на высоте полета.

Для обеспечения разработки прецизионных датчиков давления оборудована лаборатория калибровки, испытаний и проверки прецизионных приборов измерения давления. Лаборатория включает в себя уникальное метрологическое оборудование:

- цифровые контроллеры давления Ruska 7250xi и Ruska 7252, обеспечивающие задание и измерение давления с относительной погрешностью 0,005 %,
- цифровые контроллеры давления Wika CPC8000 с относительной погрешностью 0,01 % на разные диапазоны измерений,
- калибратор приборов воздушных сигналов Model 6300-M3 с относительной погрешностью 0,007 %,
- грузопоршневой манометр Wika CPB5000 с относительной погрешностью 0,01 % (от измеряемой величины).

Для обеспечения прецизионной калибровки и испытаний изделий во всем диапазоне рабочих температур лаборатория оснащена климатическими камерами температуры и влажности и жидкостными термостатами, обеспечивающими задание и поддержание температуры с высокой точностью до 0,01 °С.

Метрологическое оборудование использовалось при проведении испытаний в целях утверждения типа средств измерений и используется для проведения проверки прецизионных датчиков давления.

В целях дальнейшего совершенствования разработанных датчиков давления были проведены работы по исследованию погрешности во всем диапазоне температур.

На рисунке 9 приведен пример круговой диаграммы погрешностей, полученных по результатам проверки датчика воздушного давления в диапазоне рабочих температур. Погрешность калибратора давления ± 10 Па.

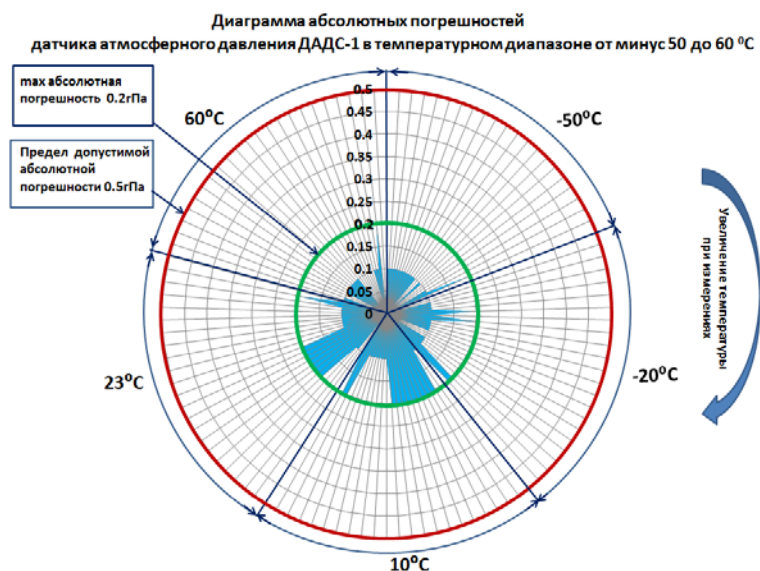


Рисунок 9 – Диаграмма погрешностей датчика воздушного давления

На рисунке 10 приведен пример круговой диаграммы погрешностей, полученных по результатам проверки датчиков гидростатического давления в диапазоне рабочих температур. Класс точности калибратора давления 0,01.

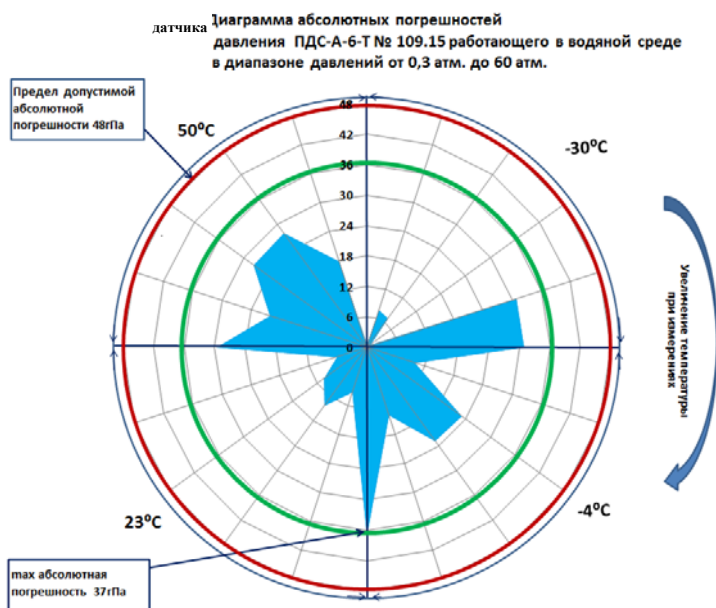


Рисунок 10 - Диаграмма погрешностей датчиков гидростатического давления

Из диаграммы на рисунке 10 видно, что полученные абсолютные погрешности при пяти температурах (минус 30, минус 4, 23, 32 и 50 °С) в диапазоне давлений от 0,03 МПа до 6,00 МПа не превышают 38 гПа, что соответствует приведенной погрешности измерения 0,07 % от ВПИ.

Проведенные исследования позволили определить возможные пути дальнейшего повышения точности датчиков гидростатического давления.

В ряде случаев у потребителя нет необходимости в прецизионном измерении давления в широком диапазоне рабочих температур. Вместо этого необходимо измерять давление с большей точностью, но в узком диапазоне температур.

Применение в датчиках давления в качестве чувствительного элемента кварцевых резонаторов, обладающих нулевым температурным коэффициентом частоты в области 25 °С [6], дает предпосылки к повышению точности измерения давления в диапазоне температур от 5 до 35 °С.

Для проверки этого предположения был дополнительно откалиброван датчик давления, диаграмма погрешностей во всем диапазоне рабочих температур которого приведена на рисунке 8. При этом

температурный диапазон в ходе калибровки был разбит на три поддиапазона. В результате были получены точностные характеристики, представленные на рисунке 11.

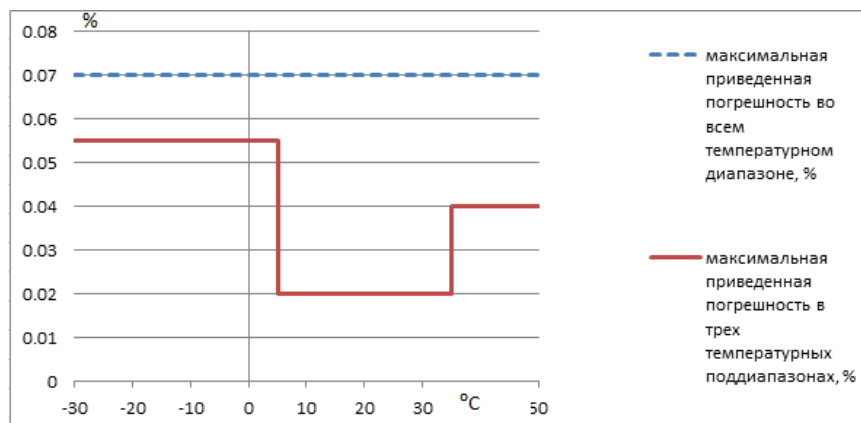


Рисунок 11 - Максимальные приведенные погрешности во всем температурном диапазоне и в трех температурных поддиапазонах

В поддиапазоне от минус 30 до 5 °C приведенная погрешность не превысила 0,055 % от ВПИ, в поддиапазоне от 5 до 35 °C – 0,02 % от ВПИ, в поддиапазоне от 35 до 50 °C – 0,04 % от ВПИ.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что достижение более высоких точностных характеристик возможно, если при калибровке датчика давления широкий температурный диапазон разбить на поддиапазоны. Таким образом, в случае, когда широкий температурный диапазон по условиям эксплуатации не требуется, и датчик работает в среднем температурном диапазоне, такая калибровка является оправданной даже при несколько усложненном алгоритме обработки [7].

Заключение

Разработан ряд специализированных прецизионных датчиков гидростатического и воздушного давления различного назначения на базе высокочастотных кварцевых резонаторов. Достигнуты погрешности измерения датчиков гидростатического давления $\pm 0,08$ % от ВПИ и датчиков воздушного давления $\pm 0,02$ % от ВПИ во всем диапазоне рабочих температур.

Исследованы возможности дальнейшего повышения точности датчиков давления. Определено, что повысить точность разработанных датчиков гидростатического давления без внесения изменений в конструкцию возможно разбиением диапазона рабочих температур на поддиапазоны с повышением точности до $\pm 0,02$ % в диапазоне от 5 до 35 °C в случае, когда потребителю необходима высокая точность в узком диапазоне температур, например для автономных необитаемых подводных аппаратов.

Освоен серийный выпуск датчиков гидростатического давления, выполненных на отечественной элементной базе, и осуществляется их поставка.

Литература

1. **Симонов, В. Н.** Микрокамертонные кварцевые датчики // Современная электроника. – 2006. – № 6. – С.32-35.
2. **Савельев, Ю. В.** Опыт разработки и применения прецизионных пьезорезонансных датчиков давления // Приборы. – 2011. – №3. – С.25-27.
3. **Савельев, Ю. В.** Специализированные пьезорезонансные датчики давления // Приборы. – 2013. – №5. – С.18-20.
4. **Свинолулов, Ю. Г.** Конструктивные и метрологические характеристики измерителя глубины погружения подводного аппарата / Ю. Г. Свинолулов, А. А. Машкин, Н. А. Брагин // Перспективные системы и задачи управления. – Издательство Южного федерального университета, 2016. – № 2. – С.180-191.
5. **Савельев, Ю. В.** «Импортозамещение – кварцевые пьезорезонансные высокоточные датчики давления различного назначения»//Радиопромышленность. – 2015. – Вып. 2. – С. 153 – 163.
6. **Малов, В. В.** Пьезорезонансные датчики. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 272 с.
7. **Анцев, И. Г.** Прецизионные пьезорезонансные кварцевые датчики давления для робототехнических комплексов и систем управления / И. Г. Анцев, Ю. В. Савельев, А. Г. Царенко // «Перспективные системы и задачи управления»: материалы Одиннадцатой Всероссийской научно-практической конференции. – Том 2. – Издательство Южного федерального университета, 2016. – С.175-184.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЬБОВЫХ КАЛИБРОВ

Э. Ф. Аскарва¹, Е. Б. Брюховецкая², Ю. Г. Захаренко³, Н. А. Кононова⁴, А. А. Москалев⁵,
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», Санкт-Петербург, РФ, ¹E.F.Askarova@vniim.ru,
²E.B.Bruhovetskay@vniim.ru, ³Y.G.Zacharenko@vniim.ru, ⁴N.A.Kononova@vniim.ru,
⁵A.A.Mosckalev@vniim.ru

Е. А. Михеев⁶

ПАО «МегаФон», Санкт-Петербург, РФ, evgeny.mikheev@megafon.ru

Аннотация

Ключевые слова: резьбовые соединения, резьбовые калибры, средний диаметр, программное обеспечение

В работе кратко изложены законодательные и прикладные проблемы метрологического обеспечения резьбовых соединений. Представлено описание Государственного рабочего эталона 1 разряда единицы длины – метра, введенного в эксплуатацию во ВНИИМ. Показаны возможности применения эталона в области измерений параметров резьбовых калибров. Описано разработанное авторами программное обеспечение для обработки результатов измерений основного параметра резьбовых калибров – среднего диаметра – с использованием эталона. Приведены предварительные результаты применения программного обеспечения. Сформулированы перспективные с точки зрения авторов направления дальнейшей разработки программного обеспечения в рамках совершенствования и исследования эталона ВНИИМ в части метрологического обеспечения резьбовых соединений.

Введение

Метрологическое обеспечение резьбовых соединений – одна из актуальных задач современной метрологии. Резьбовые соединения широко используются во многих отраслях промышленности, в том числе и в судостроении. В зависимости от области применения к таким соединениям предъявляются различные требования по надежности и износостойкости, а интенсивный рост и развитие промышленности ведут к повышению таких требований. Поскольку эксплуатационные характеристики резьбового соединения определяются точностью изготовления геометрических элементов резьбы, возникает задача повышения точности контроля таких элементов, а, следовательно, необходимо вести речь о метрологическом обеспечении в данной области.

Для контроля резьбы на рабочих деталях и узлах применяют резьбовые калибры, по характеру свинчивания которых с рабочей резьбой определяют ее пригодность к применению. Резьбовые калибры в свою очередь подвергают поэлементному контролю с помощью различных средств измерений, более высоких по точности: координатно-измерительных машин или горизонтальных длиномеров.

В метрологическом обеспечении резьбовых соединений есть ряд существенных проблем как законодательного, так и прикладного характера.

Это связано, главным образом, с тем, что в современной метрологии нет однозначного подхода к классификации резьбовых калибров, как средств измерений. А, следовательно, нет поверочных схем, нет единообразия во взгляде на пригодность тех или иных калибров для контроля резьб разной точности, нет четких требований к перечню параметров резьбы и способу их выражения, необходимых для наиболее объективной оценки точности изготовления резьбового калибра. Фактически в данной области измерений отсутствует прослеживаемость к государственному первичному эталону. Ситуация усугубляется также ввиду того, что метрологические требования к резьбовым калибрам отличаются в разных странах, и строгого соответствия между нормативными документами в этой области нет. Кроме того, существует ряд предприятий, выпускающих специфические резьбовые соединения с узкой областью применения, обладающие характеристиками, не подлежащими объективному контролю с помощью резьбовых калибров, изготовленных по действующим стандартам, следовательно, формальный статус таких соединений остается неопределенным.

Резьбовые калибры практически не вносятся в Государственный реестр средств измерений Российской Федерации. Такая ситуация влечет за собой следующую проблему – отсутствие метрологического обеспечения специализированных приборов для измерений параметров резьбы.

Не менее серьезные проблемы связаны с прикладными задачами измерений параметров резьбы и резьбовых калибров. В Российской Федерации функционирует более сотни региональных центров

¹ Инженер.

² Научный сотрудник.

³ Кандидат технических наук, зам. руководителя отдела.

⁴ Кандидат технических наук, руководитель лаборатории.

⁵ Инженер 2 категории.

⁶ Старший инженер по эксплуатации сетевых сервисов.

стандартизации и метрологии. Из них услуги по измерениям резьбовых калибров предлагают около трети. При этом большинство лабораторий работают с ограниченной номенклатурой типов калибров в узком диапазоне диаметров (как правило, не более 50 мм).

Работа ВНИИМ в области метрологического обеспечения резьбовых калибров

Работы по созданию системы метрологического обеспечения резьбовых калибров и соединений ведутся во ВНИИМ с 2001 года. За это время были разработаны несколько нормативных документов в данной области: методики поверки, поверочная схема для калибров замковой резьбы, и др.

В 2014 г. во ВНИИМ введен в эксплуатацию Государственный рабочий эталон 1-го разряда для средств измерений длины в диапазоне ($10^{-6} - 1100$) мм. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений согласно разряду по государственной поверочной схеме для средств измерений длины соответствуют $\pm(0,05+0,5\cdot L)$ мкм, где L – измеряемая величина в метрах. Эталон разработан на базе приобретенного годом ранее горизонтального длиномера LabConcept NANO фирмы Trimos (Швейцария). Основная область применения эталона – высокоточные измерения эталонных плоскопараллельных концевых мер длины, эталонных измерительных колец, мер толщины. За счет использования специальных аксессуаров область применения эталона была распространена на калибры цилиндрической резьбы.

При создании эталона был осуществлен комплекс мер, направленный на снижение неопределенности измерений с использованием эталона, в частности размещение эталона в отдельном термостатированном помещении с круглосуточным поддержанием температуры в диапазоне ($20,0\pm 0,2$) °С, а также использование в составе эталона специально спроектированного виброзащитного стола с пневматической системой с обратной связью, автоматически регулирующей горизонтальное положение длиномера, и компенсирующей изменение центра тяжести при перемещении подвижных кареток и измеряемого объекта. Кроме того, в конструкции длиномера реализован ряд технических решений, направленных на минимизацию влияющих факторов, характерных для контактных геометрических измерений. Среди таких решений: система температурной компенсации, в реальном времени вносящая поправки в результат измерений, полностью автоматическое перемещение измерительной каретки длиномера, автоматическая установка положения измерительного стола длиномера, система автоматического задания и приложения измерительного усилия.

Разработка специализированного программного обеспечения

Наиболее важным параметром резьбы является средний диаметр [1], для некоторых типов калибров его размер задается с погрешностью не выше ± 3 мкм. По среднему диаметру происходит сопряжение наружной и внутренней резьбы, однако, диаметр этот соответствует цилиндру, построенному теоретически и проходящему частично в теле калибра, что усложняет процесс измерения. Фактически все методы измерений среднего диаметра являются косвенными. Таким образом, наиболее ответственный параметр калибра является наиболее сложным для измерения. В связи с этим, когда мы говорим об измерении резьбовых калибров, речь идет в первую очередь именно об измерении среднего диаметра.

На эталоне ВНИИМ средний диаметр резьбового калибра измеряется методом трех проволочек [2]. Во впадины резьбы с противоположных сторон симметрично закладываются гладкие цилиндрические проволочки (рисунок 1), диаметр которых (d_{Π}) рассчитывается из условия касания образующих проволочек с профилем резьбы в точках, принадлежащих среднему диаметру. Далее производят контактные измерения общего размера калибра с установленными проволочками (M), из которого математически вычисляется величина среднего диаметра d_2 .

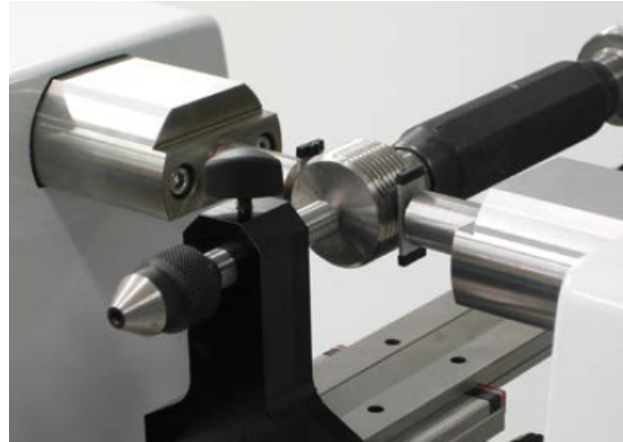
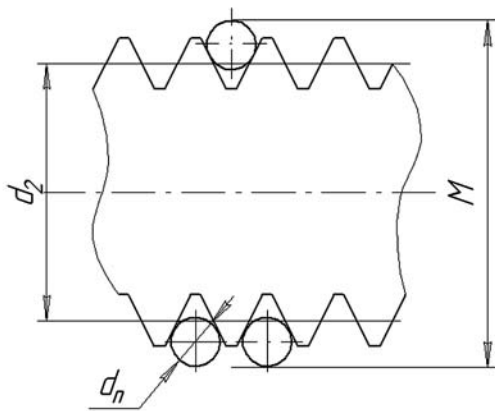


Рисунок 1 - Измерение среднего диаметра калибра-пробки методом трех проволок

Аналогично измеряется и средний диаметр внутренней резьбы калибров-колец, но в этом случае цилиндрические провололки заменяются на сферические наконечники специального Т-образного щупа длиномера.

В целях повышения степени автоматизации процесса измерений среднего диаметра резьбовых калибров на эталоне, авторами статьи было разработано специализированное программное обеспечение (далее – ПО) «Thread Gages Calculation Software» (TGCS). Программное обеспечение предназначено для вычисления величины среднего диаметра по результатам косвенных измерений, полученных с помощью эталона (рисунок 2).

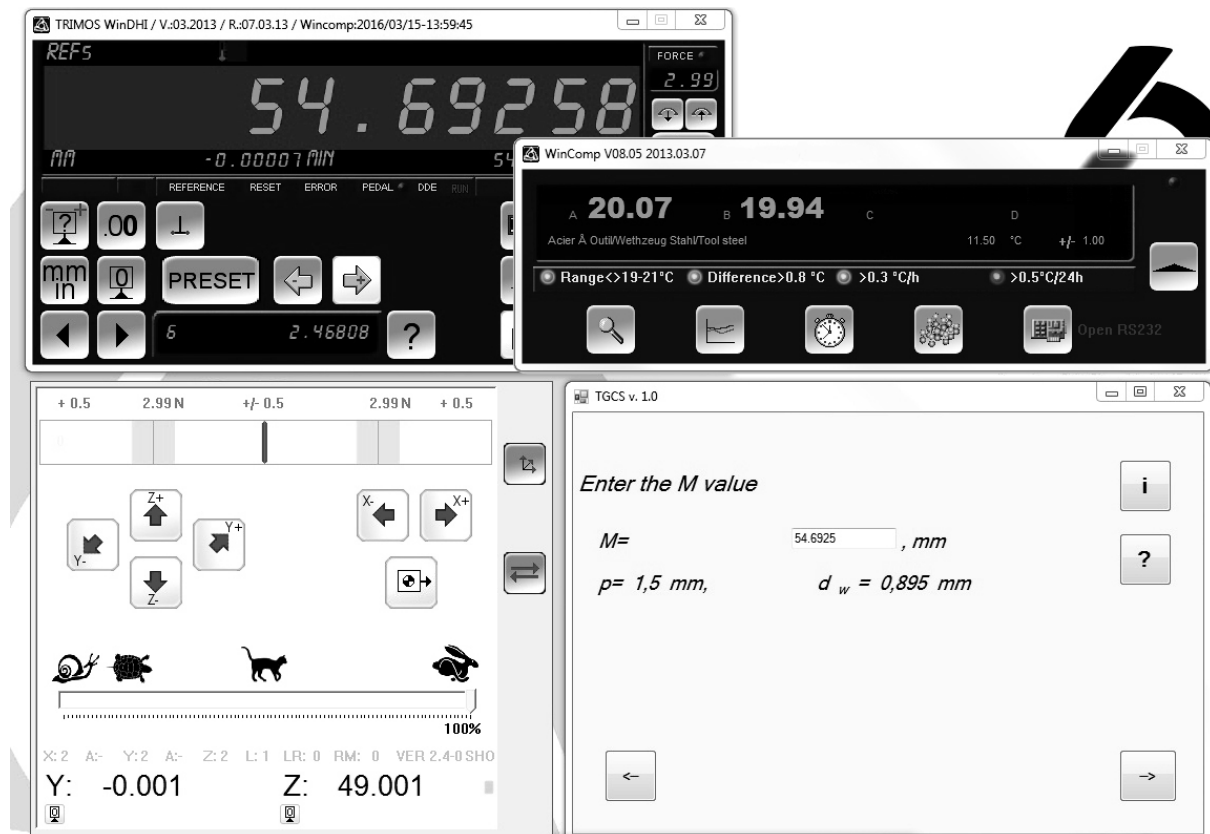


Рисунок 2 - Диалоговое окно TGCS совместно с ПО для управления измерениями WinDHI и ПО системы температурной компенсации WinComp

С декабря 2015 г. ПО TGCS используется на эталоне ВНИИМ при измерениях резьбовых калибров. Область применения ПО распространяется на цилиндрические калибры-пробки и калибры-кольца метрической, трапецидальной и трубной резьбы.

Среди технических особенностей TGCS можно выделить следующие.

Во-первых, программа полностью автономна и не требует дополнительной установки на персональный компьютер каких-либо библиотек или специального математического ПО. Программа также не привязана к вычислительным приложениям или инструментам, встроенным, например, в разнообразные офисные пакеты.

TGCS совместима с 64-разрядной операционной системой Windows 7, т.к., в такой системе работает основное программное обеспечение WinDHI, под управлением которого находятся основные функции горизонтального длиномера из состава эталона.

Поскольку поставляемый с длиномером персональный компьютер имеет европейскую локализацию, интерфейс программы TGCS был полностью реализован на английском языке, чтобы избежать возможных проблем с отображением кириллических сообщений. Кроме того, наличие англоязычного интерфейса повышает экспортный потенциал ПО.

Математическая часть TGCS предусматривает расчеты с использованием параметров цилиндрических проволочек и Т-образных щупов из набора аксессуаров, поставляемых фирмой Tgimos. Т.е., в ПО заложен перечень номинальных диаметров проволочек, фактически входящих в состав эталона, а не просто расчетные значения из соответствующей нормативной документации.

Одна из наиболее важных особенностей TGCS – полная совместимость с оригинальным комплексом ПО WinDHI. Величина M , полученная с помощью горизонтального длиномера, передается в диалоговое окно TGCS автоматически и далее преобразуется в искомое значение среднего диаметра резьбового калибра. Таким образом, использование TGCS полностью исключает человеческий фактор из процесса обработки результатов измерений и снижает трудоемкость при увеличении степени автоматизации измерений. Кроме того, применение TGCS, очевидно, минимизирует время, затрачиваемое на оценку результата измерений, что позволяет при необходимости производить серии измерений среднего диаметра, не изменяя измерительную установку. Это в частности снижает неопределенность измерений, связанную с динамическими характеристиками эталона.

Заключение

Исследования государственного рабочего эталона 1 разряда единицы длины – метра с использованием резьбовых калибров показывают, что применение специализированного ПО TGCS в совокупности с описанными выше техническими решениями позволило обеспечить расширенную неопределенность измерений среднего диаметра резьбы на эталоне порядка 0,5 мкм. Таким образом, метрологические характеристики в области измерений резьбовых калибров, полученные на эталоне ВНИИМ, не уступают лучшим аналогичным данным, заявленным ведущими зарубежными национальными метрологическими институтами [3, 4].

В ходе дальнейшего совершенствования эталона планируется расширить возможности TGCS с помощью интегрирования инструментов статистической обработки результатов измерений. Кроме того, в настоящее время во ВНИИМ разрабатывается метод измерений среднего диаметра конических резьбовых калибров с использованием горизонтального длиномера. Математическое обеспечение метода также будет отражено в последующих версиях TGCS.

Литература

1. Захаренко, Ю. Г., Кононова, Н. А., Москалев, А. А. Метрологическое обеспечение измерений. Резьбовые соединения // Контроль качества продукции. – 2015. – № 10. – С. 41–45.
2. Димов, Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация. СПб.: Питер. – 2013. – 496 с.
3. Захаренко, Ю. Г., Кононова, Н. А., Москалев, А. А. Измерения геометрических параметров резьбовых калибров. // Измерительная техника. № 2. – 2016. – С. 24 – 27.
4. Mosckalev, A. High-accurate measurements of thread gages using the Labconcept NANO horizontal instrument // 24th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance. 2014. Proceedings. Sozopol, Bulgaria. – 2014. – P. 480–485.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

С. Р. Карпиков¹

СПб ГУАП, ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: stanislav__@inbox.ru

Аннотация

Ключевые слова: МЭМС, моделирование, акселерометр, автоколебания

Представлены результаты расчёта характеристик микромеханических автоколебательных акселерометров, а именно диапазона, коэффициента преобразования и нелинейности характеристики преобразования, как при использовании градуировочного полинома, так и без него. Результаты были получены несколькими методами: аналитическим приближением, численным расчётом, численным расчётом с гармонической линеаризацией нелинейности в контуре управления акселерометра. Показано, что нелинейность характеристики преобразования может быть значительно ниже, чем в серийно выпускаемых емкостных акселерометрах.

Введение

В настоящее время идёт интенсивное развитие микроэлектромеханических систем и приборов (МЭМС) и, в частности, акселерометров. Это связано с тем, что с их использованием строятся практически все инерциальные модули систем управления подвижными объектами. Однако существующие технические решения не позволяют достичь высоких точностных характеристик при малых габаритах акселерометров. Такой вывод можно сделать, например, на основе сравнения характеристик некоторых микромеханических акселерометров, выпускаемых одним из лидеров рынка МЭМС-устройств фирмой Analog Devices за последние 20 лет и приведённых в таблице 1 [1, 2].

Таблица 1. Сравнение характеристик МЭМС-акселерометров фирмы Analog Devices

Год начала выпуска	Наименование	Диапазон	Уровень шума, $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	Отклонение чувствительности	Температурный коэффициент смещения нуля, $\text{mg}/^\circ\text{C}$	Нелинейность
1	2	3	4	5	6	7
1996	ADXL05	5g	500	$\pm 0,50\%$	$\pm 2,0$	0,2 %
2000	ADXL202	$\pm 2\text{g}, \pm 10\text{g}$	200	$\pm 0,50\%$	$\pm 2,0$	0,2 %
2009	ADXL325	$\pm 5\text{g}$	250	$\pm 0,4 \%$	$\pm 1,0$	0,2 %
2011	ADXL206	$\pm 5\text{g}$	110	$\pm 0,3\%$	$\pm 0,6$	0,2 %
2013	ADXL363	$\pm 2\text{g}, \pm 4\text{g}, \pm 8\text{g}$	175	$\pm 0,5\%$	$\pm 0,35$	0,5 %

Из таблицы 1 следует, что, несмотря на значительное уменьшение уровня шума (столбец 4) и температурных отклонений параметров (столбцы 5 и 6), нелинейность (столбец 7) МЭМС-акселерометров остаётся на уровне десятых долей процента. Это связано, в первую очередь, с используемым методом измерения ускорения, основанном на измерении ёмкости между неподвижной и подвижной обкладками, расстояние между которыми изменяется при смещении чувствительного элемента под воздействием ускорения. Такой метод предусматривает, во-первых, использование аналоговых компонентов, а во-вторых, измерение физических величин с сильно выраженной нелинейной зависимостью [3].

Возможным решением проблемы высокой нелинейности представляется использование автоколебательных акселерометров. Их особенностью является цифровой контур измерения, что позволяет сократить нелинейность, связанную с применением аналоговых компонентов в измерительной цепи, а также расширить область применения приборов [4].

Целью представленного исследования является оценка характеристики преобразования и нелинейности для автоколебательной схемы построения цифрового акселерометра и сравнение её с аналогами. Исследование проводилось с использованием математического моделирования.

Описание объекта исследования

Схема автоколебательного МЭМС-акселерометра показана на рисунке 1. Чувствительный элемент датчика закрепляется на упругих подвесах в кремниевой рамке и имеет возможность линейного

¹ Аспирант, инженер-программист.

перемещения вдоль оси чувствительности. Определённые положения чувствительного элемента фиксируются с помощью оптопар, сигнал с которых, проходя через нелинейное звено, поступает на электромагнитный силовой привод, образуя обратную связь. Силовой привод, воздействуя на чувствительный элемент, приводит его в автоколебательное движение вдоль оси измерения ускорения. При воздействии внешнего ускорения центр колебаний смещается, что приводит к изменению скважности сигнала, идущего с оптопар. Таким образом, по измерению скважности сигнала можно судить о действующем ускорении. При этом наличие нелинейной обратной связи позволяет повысить точностные характеристики по сравнению с аналогами с открытым контуром управления [5, 6].

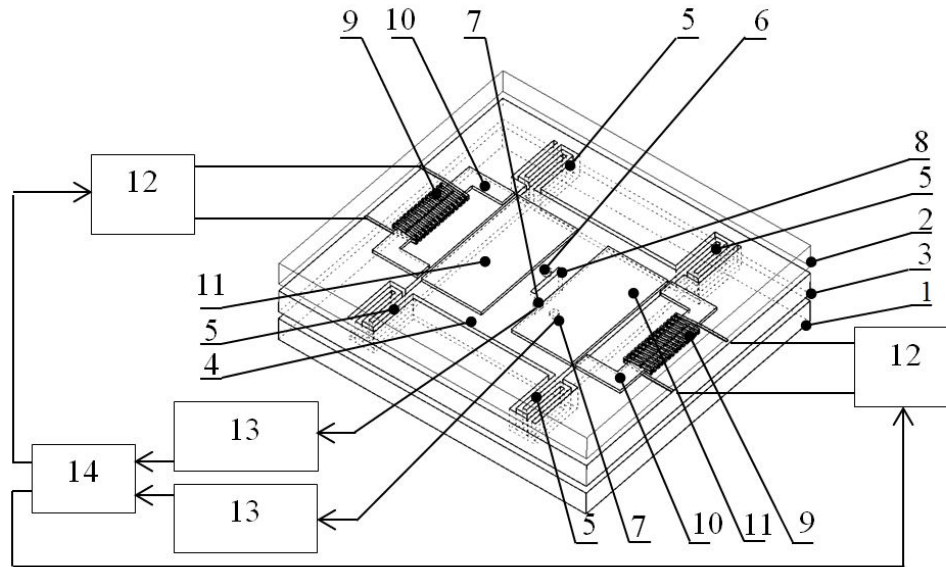


Рисунок 1 - Конструктивная схема автоколебательного датчика ускорения: 1 – основание; 2 – крышка; 3 – рамка; 4 – чувствительный элемент; 5 – упругие подвесы; 6 – излучатель; 7 – фотоприёмники; 8 – оптическая щель; 9 – планарные катушки; 10 – магнитопроводящие сердечники; 11 – магнитопроводы; 12 – усилители тока; 13 – компараторы; 14 – ключ

Математическая модель датчика

Собственное движение чувствительного элемента, который представляет собой колебательное звено, описывается дифференциальным уравнением [7]

$$T_1^2 \frac{d^2x}{dt^2} + \xi \frac{dx}{dt} + x = aT_1^2 - \frac{F_u}{c}, \quad (1)$$

где $x = x(t)$ — смещение центра чувствительного элемента от положения равновесия; $T_1^2 = m/c$ — постоянная времени; ξ — коэффициент демпфирования; $a = a(t)$ — действующее ускорение; m — масса чувствительного элемента; c — коэффициент жесткости подвесов, $F_u = F(x, \dot{x})$ — компенсирующее воздействие электромагнитного силового привода, описываемое нелинейной функцией.

Электромагнитный силовой привод (рисунок 2) представляет собой аperiodическое звено 1 порядка и описывается уравнениями [8]

$$U - L \frac{di}{dt} = (R + r)i, \quad (2)$$

$$F_u = \frac{F_{\max} i}{U(R + r)} \Phi(x, \dot{x}), \quad (3)$$

где U — напряжение на катушках индуктивности, $i = i(t)$ — ток в катушках, R — сопротивление катушек, r — внутреннее сопротивление источника тока, L — индуктивность катушек, F_{\max} — сила, с которой электромагнитные приводы действуют на чувствительный элемент, $\Phi = \Phi(x, \dot{x})$ — функция нелинейного звена (рисунок 3).

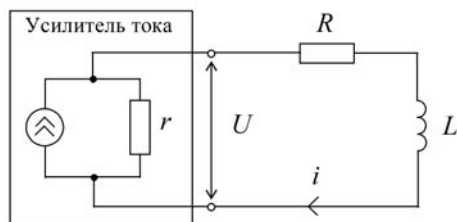


Рисунок 2 - Эквивалентная схема электромагнитного привода

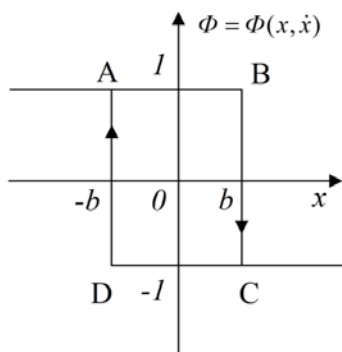


Рисунок 3 - График нелинейной функции $\Phi = \Phi(x, \dot{x})$, b – точки переключения нелинейного звена в обратной связи датчика (ABC при $\dot{x} > 0$ и CDA при $\dot{x} < 0$)

При нулевых начальных условиях можно произвести операторную замену $p = d/dt$ и на основе уравнений (1), (2) и (3) записать полное уравнение собственного движения чувствительного элемента

$$(T_1^2 p^2 + \zeta p + 1)(T_2 p + 1)x + \frac{F_{\max} \Phi(x, px)}{c} = aT_1^2, \quad (4)$$

где $T_2 = L/(R+r)$ – постоянная времени электромагнитного силового привода. Далее это уравнение решается численно методом припасовывания.

Задачей датчика является измерение ускорения a посредством измерения количества отсчетов $\tau = (\tau_1 - \tau_2) / (\tau_1 + \tau_2)$, где $\tau_1 = (t_2 - t_1)$, $\tau_2 = (t_3 - t_2)$ – промежутки времени между сменой состояния нелинейного звена (рисунок 4). При этом измеренное ускорение $a_m = K\tau$, где K – постоянный коэффициент.

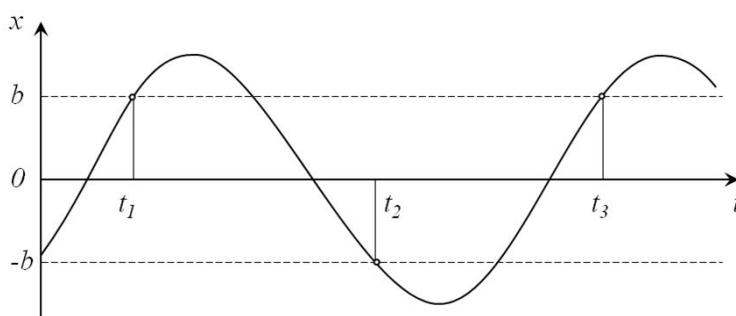


Рисунок 4 - Один период колебаний

Для определения характеристик датчика также можно воспользоваться гармонической линеаризацией нелинейной функции в предположении, что движение чувствительного элемента описывается синусоидальной функцией. В этом случае, нелинейную функцию $\Phi(x, px)$ заменим линейной аппроксимацией [7, 9]

$$\Phi(x, px) = qx + \frac{q' px}{\omega}, \quad (6)$$

где q, q' – коэффициенты гармонической линеаризации, а решение уравнения (4) запишем как

$$x = A \sin(\omega t) + aT_1^2, \quad (7)$$

где A – амплитуда автоколебаний чувствительного элемента, ω – частота автоколебаний, которые могут определяться численно или графически [10]. Далее нелинейное дифференциальное уравнение (4) можно решать как линейное, например, численно, сделав замену (6).

Ввиду сложности аналитического решения уравнения (4) даже с заменой (6), характеристику датчика также приближенно определим по формуле (7).

Искомые величины t_1 , t_2 и t_3 определим из системы уравнений, составленных из условий пересечения функцией $x(t)$ точек $\pm b$ (рисунок 4)

$$\begin{cases} A \sin(\omega t_1) + aT_1^2 = b, \\ A \sin(\omega t_2) + aT_1^2 = -b, \\ A \sin(\omega t_3) + aT_1^2 = b. \end{cases} \quad (8)$$

Выразив из системы (8) t_1 , t_2 и t_3 , определим τ :

$$\tau = \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{b + aT_1^2}{A}\right) - \arcsin\left(\frac{b - aT_1^2}{A}\right). \quad (9)$$

Описание исследования

В ходе исследования были проанализированы три разных автоколебательных акселерометра, параметры которых приведены в таблице 2.

Для каждого акселерометра была построена характеристика на основе численного решения уравнений (4) и (4) с заменой (6) и аналитического приближения по формуле (9), пример полученной характеристики показан на рисунке 5.

Таблица 2 - Параметры исследуемых акселерометров

Наименование параметра	Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3
Механические параметры			
Масса чувствительного элемента, m , кг	$7 \cdot 10^{-7}$	$20 \cdot 10^{-7}$	$10 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент жесткости подвесов, c , Н/м	2,5	3,0	1,5
Коэффициент демпфирования, ξ	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Параметры нелинейного звена			
Точки переключения нелинейного звена, b , мкм	5,0	15,0	1,5
Параметры электромагнитного привода			
Сила электромагнитных приводов, F_{\max} , мкН	5,0	50,0	0,1
Сопротивление катушек, R , Ом	100	300	10
Сопротивление источника тока, r , Ом	0,1	0,1	0,1
Индуктивность катушек, L , мГн	10,0	320,0	1,0
Напряжение, U , В	1,0	1,0	1,0

Результаты исследования

Результаты моделирования датчиков приведены в таблицах 3, 4 и 5. Для каждого датчика был определен максимальный диапазон измеряемого ускорения, при превышении которого происходит срыв автоколебаний. Дополнительно был определен диапазон измеряемого ускорения, при котором отношение полупериодов τ_1 к τ_2 не превышает 0,8 (на этом диапазоне наблюдались наиболее устойчивые колебания и меньшее отклонение характеристики от линейной). Для каждого диапазона определен масштабный коэффициент в предположении, что частота импульсов заполнения при измерении полупериодов равна 100 МГц.

Дополнительно проанализирована возможность калибровки датчиков с использованием градуировочного полинома, когда величина измеренного ускорения $a_{\text{изм}}$ рассчитывается как полином третьей или пятой степени от τ .

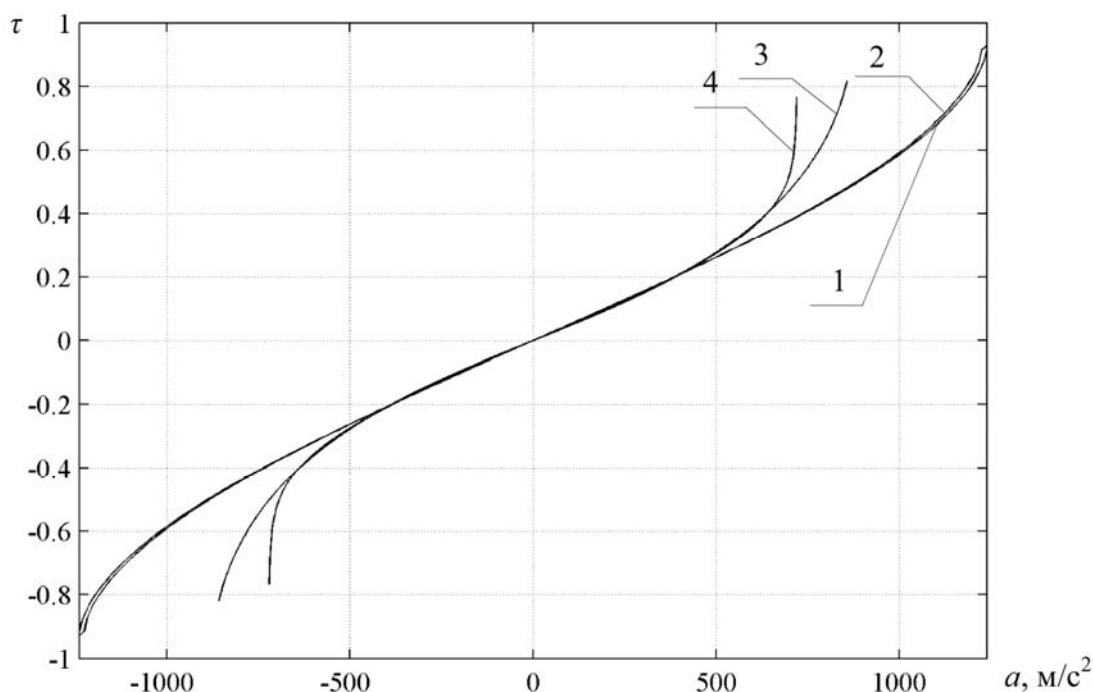


Рисунок 5 - Вид характеристики преобразования датчика: 1) аналитическое решение по формуле (9); 2) численное решение по формуле (9) с корректировкой амплитуды; 3) численное решение уравнения (4) с гармонической линеаризацией нелинейности по формуле (6); 4) численное решение уравнения (4)

Таблица 3 - Рассчитанные параметры датчика 1

Метод расчёта	Моделирование без упрощения нелинейного звена			Моделирование с использованием гармонической линеаризации		
	1	3	5	1	3	5
Максимальный диапазон	± 20 g			± 25 g		
Диапазон при отношении полупериодов 0,8	± 4 g			± 5 g		
Коэффициент преобразования на полном диапазоне	12200 count/g			8600 count/g		
Коэффициент преобразования при отношении полупериодов 0,8	7500 count/g			6100 count/g		
Степень градуировочного полинома	1	3	5	1	3	5
Нелинейность на полном диапазоне	23,5 %	1,09 %	0,084 %	20,4 %	0,35 %	0,057 %
Нелинейность при отношении полупериодов 0,8	0,25 %	0,00053 %	0,00024 %	0,28 %	0,0010 %	0,00053 %

Таблица 4 - Рассчитанные параметры датчика 2

Метод расчёта	Моделирование без упрощения нелинейного звена			Моделирование с использованием гармонической линеаризации		
	Максимальный диапазон	± 70 g			± 85 g	
Диапазон при отношении полупериодов 0.8	± 23 g			± 24 g		
Коэффициент преобразования на полном диапазоне	5800 count/g			5300 count/g		
Коэффициент преобразования при отношении полупериодов 0.8	2500 count/g			2400 count/g		
Степень градуировочного полинома	1	3	5	1	3	5
Нелинейность на полном диапазоне	18,8 %	0,97 %	0,063 %	28,1 %	0,89 %	0,29 %
Нелинейность при отношении полупериодов 0.8	0,74 %	0,0024 %	0,0014 %	0,83 %	0,036 %	0,0015 %

Таблица 5 - Рассчитанные параметры датчика 3

Метод расчёта	Моделирование без упрощения нелинейного звена			Моделирование с использованием гармонической линеаризации		
	Максимальный диапазон	± 3,2 g			± 3,8 g	
Диапазон при отношении полупериодов 0.8	± 0,6 g			± 0,7 g		
Коэффициент преобразования на полном диапазоне	125000 count/g			87000 count/g		
Коэффициент преобразования при отношении полупериодов 0.8	80300 count/g			68000 count/g		
Степень градуировочного полинома	1	3	5	1	3	5
Нелинейность на полном диапазоне	25,5 %	1,64 %	0,098 %	20,2 %	0,86 %	0,63 %
Нелинейность при отношении полупериодов 0.8	0,21 %	0,00029 %	0,00025 %	0,21 %	0,00052 %	0,00029 %

Выводы

По результатам исследования на основе анализа таблиц 3, 4 и 5 были сделаны следующие выводы:

а) Аналитическое приближение (9) и численное решение уравнения (4) с гармонической линеаризацией нелинейности при малом измеряемом ускорении совпадает с численным решением уравнения (4) без упрощений, следовательно, при проектировании датчиков для определения многих характеристик можно пользоваться более простыми методами, не прибегая к ресурсоёмкому численному решению.

б) Нелинейность датчиков при отношении полупериодов 0,8 даже без использования градуировочного полинома для компенсации нелинейности близка к значению для серийно выпускаемых МЭМС-акселерометров. При этом по найденному коэффициенту преобразования можно судить о том, что остаётся запас для дальнейшего уменьшения нелинейности не только введением градуировочного полинома, но и сокращением диапазона измеряемого ускорения, что невозможно для электростатических МЭМС-акселерометров.

в) При использовании градуировочного полинома нелинейность характеристики для всех рассмотренных датчиков существенно снижается до $1 \cdot 10^{-3} \%$ и менее. При этом ввести цифровую обработку сигнала в датчик рассмотренной конструкции значительно проще, чем в электростатические приборы, ввиду использования цифрового контура измерения.

В целом результаты исследования свидетельствуют о том, что автоколебательные акселерометры не только обладают точностными характеристиками, сравнимыми с аналогичными характеристиками емкостных МЭМС-акселерометров, но при этом имеют потенциал для их существенного улучшения при сохранении малых габаритных размеров.

Литература

1. Analog devices. Таблица выбора для категории MEMS Accelerometer [Электронный ресурс] – 2015. — Режим доступа: <http://www.analog.com/ru/parametricsearch/10129#/p4510=Accelerometer>, свободный.
2. Matej, Andrejaic. MEMS Accelerometers [Text]/University of Ljubljana, – 2008. – 17 с.
3. Thomas B. Jones, Nenad G. Nenadic Electromechanics and MEMS – Cambridge University Press, 2013. - 577 с.
4. Карпиков, С. Р. Микромеханический автоколебательный акселерометр с перестраиваемым диапазоном измерения // Вопросы радиоэлектроники. – М.:ЦНИИ Электроника, 2014. - №2. – С. 220-227.
5. Waters, R. L. Factors Influencing the Noise Floor and Stability of a Time Domain Switched Inertial Device / Waters R. L., Fralick M., Jacobs D., Abassi S., Dao R., Carbonari D., Maurer G. // *Proceedings of IEEE/ION PLANS 2012*, Myrtle Beach, South Carolina. - 2012. - P. 1099-1105.
6. Коновалов, С. Ф. Гибридные микроэлектромеханические гироскопы и акселерометры / Пономарев Ю. А., Майоров Д. В // Наука и образование. - 2011. - №10.
7. Бесекерский, В. А., Попов, Е. П. Теория систем автоматического управления: учеб. пособие. - СПб.: Профессия, 2007. - 761 с.
8. Amir J. Majid Electrostatic and electromagnetic fields actuators for MEMS AD/DA converters [Text] // *International journal of Engineering (IJE)*, – 2008, –Vol. 2. – P.35-41.
9. Дорф, Р., Бишоп Р. Современные системы управления. - М.:Лаборатория базовых знаний, 2012. – 832 с.
10. Гайдук, А. Р. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB: учеб. пособие / Гайдук А. Р., Беляев В. Е., Пьявченко Т. А., - СПб.: Лань, 2011. – 464 с.

УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ МОМЕНТОВ ПО ПАРАМЕТРУ ЭМК

И. С. Хасиев¹

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», С-Петербург, РФ, e-mail: i.S.Khasiev@vniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: магнитный момент, переменное магнитное поле

Представлена установка для контроля магнитных моментов переменного поля судового электрооборудования (УКММ), разработанная во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева для Берегового испытательного стенда АО «СНСЗ».

Анализируется состав, принцип действия, основные метрологические и технические характеристики, а также конструкция разработанной и изготовленной установки. Проведено сравнение УКММ с существующей аппаратурой аналогичного назначения. Показано, что габариты УКММ в 2 раза меньше габаритов существующих установок такого типа при возможности одновременно измерять три компоненты магнитного момента с необходимой точностью. Это достигается выполнением первичного измерительного преобразователя (ПИП) по «безмоментной» схеме в виде трехкомпонентных катушек кубической формы.

Приведены результаты расчета магнитной индукции в рабочем объеме ПИП по продольной и поперечным компонентам. Показана расчетная зависимость размеров рабочего объема ПИП от точности изготовления его элементов.

Для контроля параметра ЭМК согласно нормативной документации (например МКММ-90) могут использоваться средства измерений на основе, как нескольких "точечных" измерителей магнитной индукции переменного поля, так и индукционных датчиков в виде катушек, охватывающих измеряемый магнитный момент. Все указанные средства измерений чувствительны к внешним промышленным помехам и их градиентам.

Во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева разработана уникальная установка для контроля магнитных моментов по параметру ЭМК (УКММ), сочетающая в себе высокую производительность и точность измерений с максимальным подавлением внешних переменных магнитных помех [1].

Установка состоит из первичного измерительного преобразователя (ПИП), в виде системы трехкомпонентных катушек с внутренним доступным объемом $1,9 \times 1,9 \times 1,9 \text{ м}^3$, и электроники, соединенной с персональным компьютером. Уникальной является конфигурация и конструкция ПИП, который выполнен в виде двойной трехкомпонентной системы катушек с совмещенным геометрическим центром. Это позволяет одновременно измерять три компоненты магнитного момента с подавлением магнитных помех также по трем компонентам.

На рис. 1 показана традиционная конструкция ПИП в виде двух идентичных катушек, включенных последовательно-встречно, в одну из которых (измерительную) помещается измеряемый магнитный момент, а вторая (компенсационная) служит для компенсации внешних магнитных помех.

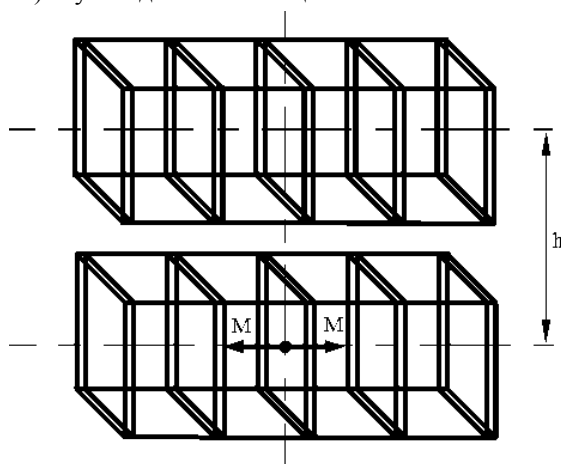


Рисунок 1 - Традиционная конструкция ПИП

Для измерения параметра ЭМК изделия размером 1000 мм с погрешностью около 2 % таким ПИП необходимо иметь две катушки не менее $1,6 \times 1,6 \times 1,6 \text{ м}^3$. С целью уменьшения габаритов ПИП при сохранении требуемой погрешности измерений использована четырехсекционная квадратная катушка типа Баркера [2], выполненная по «безмоментной» схеме, когда геометрические центры измерительной и компенсационной катушек совпадают, но компенсационный контур охватывает измерительный.

¹ Ведущий инженер.

На рис. 2 представлена уменьшенная модель разработанного ПИП.

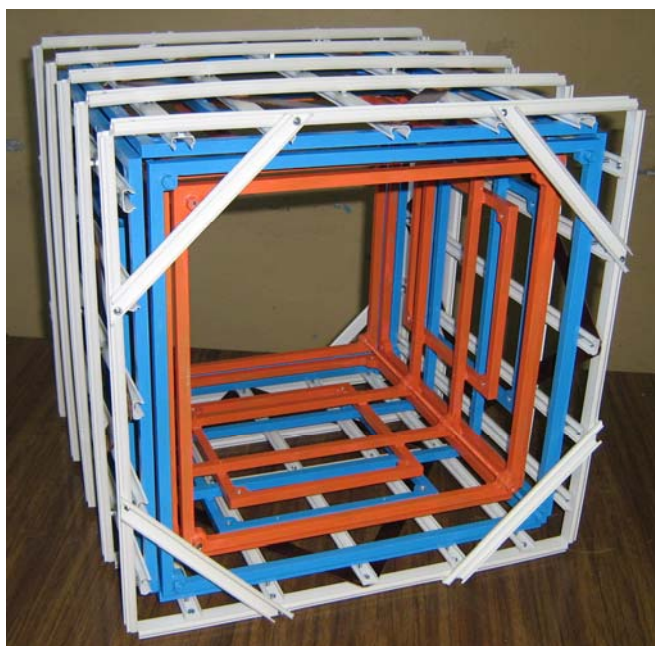


Рисунок 2 - Фотография модели разработанного ПИП

Внутри видны три компоненты измерительного контура, далее - три компоненты компенсационного контура, а белые элементы - несущий каркас, на котором крепятся компоненты обоих контуров ПИП. Использован принцип "обратной матрешки", когда сначала собирается внешний несущий каркас, а затем к нему крепятся последовательно поперечные компоненты компенсационного контура и продольная компонента компенсационного контура. Далее, в той же последовательности устанавливаются компоненты внутреннего (измерительного) контура.

Продольные компоненты X (измерительная и компенсационная) выполнены подобными на основе четырехсекционных квадратных катушек типа Баркера [2], а поперечные Y и Z - на основе четырехсекционных квадратных катушек типа Гаррета [3]. Этим достигается максимальная компактность ПИП, когда при внутреннем полезном объеме $1,9 \times 1,9 \times 1,9 \text{ м}^3$, внешние размеры по каркасу не превышают $2,7 \times 2,7 \times 2,7 \text{ м}^3$.

Благодаря совмещению геометрических центров измерительного и компенсационного контуров исключается ошибка в компенсации градиентных внешних магнитных помех в рабочем объеме ПИП, а однородные помехи подавляются в $100 \div 1000$ раз.

Измеряемый при помощи УКММ магнитный момент переменного поля вычисляется по известной формуле:

$$M_i = \frac{U_i}{6,2832 \times f \times K_{ПВ_i} \times K_{\Phi_i} \times K_{B_i}},$$

где M_i - магнитный момент переменного поля на частоте f по i -той компоненте, А·м;

U_i - значение переменного напряжения, фиксируемого на выходе аппаратуры на частоте f по i -той компоненте, В;

f - частота, на которой измеряется магнитный момент, Гц;

$K_{ПВ_i}$ - коэффициент усиления по i -той компоненте на частоте f , блока предварительных усилителей, отн. ед.;

K_{Φ_i} - коэффициент усиления по i -той компоненте на частоте f , блока электронного, отн. ед.;

K_{B_i} - постоянная по магнитной индукции переменного поля по i -той компоненте ПИП на частоте f , Тл/А.

Очевидно, что большинство параметров из вышеприведенной формулы может быть определено достаточно точно и может поддерживаться стабильным в течение длительного времени. Наибольшую погрешность в результат измерений магнитного момента вносит изменение постоянной по индукции в рабочем объеме ПИП по мере удаления от его геометрического центра. Поэтому, необходимо иметь в качестве ПИП меру магнитной индукции с максимальным размером однородного рабочего объема.

В таблице 1 приведены расчетные значения напряженности поля H в относительных единицах (по отношению к полю в геометрическом центре H_0) в рабочем объеме продольной компоненты X ПИП УКММ для координат $X, Y, Z \pm 0,25$ м и $\pm 0,5$ м.

Таблица 1

		H/H_0 , отн. ед.								
		0			0,25			0,5		
$Z, \text{ м}$										
$Y, \text{ м}$		0	0,25	0,5	0	0,25	0,5	0	0,25	0,5
$X, \text{ м}$	0	1,0000	0,9994	0,9871	0,9994	0,9989	0,9868	0,9871	0,9868	0,9757
	0,25	0,9997	1,0009	0,9942	1,0009	1,0022	1,0119	1,0106	1,0119	1,0219
	0,5	0,9943	0,9982	0,9892	0,9982	1,0019	0,9926	0,9892	0,9926	0,9830

Из таблицы 1 следует, что в сфере диаметром 500 мм неоднородность не превышает $\pm 0,11$ %, а в сфере диаметром 1000 мм неоднородность не превышает $\pm 1,3$ %. При этом в рабочем объеме в виде куба с размерами $1000 \times 1000 \times 1000$ мм³ неоднородность не превысит $\pm 2,2$ %.

Аналогичные расчеты, проведенные для поперечных компонент Y и Z ПИП УКММ, показывают, что неоднородность в сфере диаметром 500 мм не превышает $\pm 1,5$ %, а в сфере диаметром 1000 мм - ± 12 %.

Существенное влияние на размеры однородного рабочего объема ПИП имеет точность изготовления элементов ПИП. Расчеты показали, что для продольной компоненты X ошибка на ± 1 мм в расстоянии между секциями приводит к сокращению рабочего объема с 1000 мм до 990 мм. Так же высоки требования к размерам и взаимному положению всех секций катушки.

УКММ снабжена встроенной системой проверки работоспособности по всем трем компонентам, которую можно использовать, при необходимости, для оперативной самокалибровки.

В состав блока электронного УКММ входит двухзвенный полосовой перестраиваемый аналоговый фильтр на 50 Гц и 400 Гц, позволяющий измерять переменное напряжение с погрешностью не более 1 % при расстройке от центральной частоты на ± 4 %. При этом обеспечивается затухание за пределами полосы пропускания до 26 дБ на октаву.

Для измерения магнитных моментов и анализа внешних полей в широкой полосе частот в состав УКММ включен анализатор спектра PCS500, работающий, как приставка к компьютеру, на принципе "быстрого преобразования Фурье". Анализатор позволяет определять частоту входного сигнала с погрешностью не более 0,5 % и измерять напряжения с погрешностью не более 10 %, что достаточно для оперативной оценки анализируемых сигналов.

Для более точных измерений служит мультиметр Agilent 34401A с погрешностью измерений напряжения переменного тока в интересующем нас частотном диапазоне не более 0,1 %.

Метрологическое обеспечение УКММ осуществляется при помощи аппаратуры M116M, представляющей собой эталонную меру магнитного момента переменного поля 1-го разряда с широким диапазоном воспроизводимых магнитных моментов от 0,4 до 12 А·м² на частотах 50 Гц и 400 Гц и пределом допускаемой основной погрешности ± 5 %.

В результате, предел допускаемой основной погрешности измерений трех компонент магнитного момента переменного поля в рабочем объеме УКММ в виде сферы диаметром 1000 мм на частотах 50 Гц и 400 Гц не превышает 18 %.

Таким образом, представленная установка является уникальной по своим основным техническим и метрологическим характеристикам и может быть рекомендована для оснащения предприятий, выпускающих либо устанавливающих судовое электрооборудование, подлежащее контролю по параметру ЭМК.

Литература

1. Комплекс магнитометрической аппаратуры для измерений переменных магнитных полей /Ю. Н. Бобков, А. Н. Пронин, И. С. Хасиев, В. И. Шеремет // 2-я Всероссийская научно-техническая конференция Судометрика-2008.-СПб.: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2008. -С. 114.
2. Средства измерений параметров магнитного поля/Ю. В. Афанасьев [и др.]. - Л.: "Энергия", Ленингр. отд-ние, 1979. -320 с.
3. Чхиквадзе, Т. И. Трехкомпонентные катушки магнитной индукции с увеличенным рабочим объемом/ Т.И. Чхиквадзе, В.Я. Шифрин//Геофизическая аппаратура. -1979. - Вып. 69. -С. 73-81.

ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ ЗАПОМИНАЮЩИХ ОСЦИЛЛОГРАФОВ

С. С. Чистякова¹

АО «ПРИСТ», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: chistyakova@prist.ru

Аннотация

Ключевые слова: разрешающая способность, аналого-цифровой преобразование, цифровой запоминающий осциллограф

Распространение цифровых технологий позволило расширить область применения осциллографов. Теперь это не только прибор визуального наблюдения и регистрации формы сигнала, но и инструмент измерения параметров этих сигналов. Какова точность проводимых осциллографом измерений? В цифровых запоминающих осциллографах основным параметром, влияющим на точность, является разрешающая способность системы аналого-цифрового преобразования. В статье приведена классификация и дан обзор технологий повышения разрешающей способности цифровых запоминающих осциллографов, рассмотрены новейшие методы и приведены характеристики широкополосных осциллографов высокой четкости.

Введение

На протяжении последних лет в России наблюдается замещение аналоговых осциллографов цифровыми запоминающими осциллографами реального времени (ЦЗО). Неоспоримыми достоинствами ЦЗО является возможность проведения измерений временных, амплитудных и комбинированных параметров захваченных сигналов цифровой системой обработки данных осциллографа. Сформированные данные по желанию пользователя могут быть отображены на экране осциллографа, переданы на ЭВМ, сохранены на флэш-носители информации и/или использованы для последующей математической обработки, фильтрации сигнала в ЦЗО.

Сложностей с измерениями временных параметров не возникало. Трудности наблюдаются при проведении амплитудных измерений (с малой погрешностью) низковольтных сигналов переменного тока, наблюдаемых совместно с постоянной составляющей, а также высокочастотных сигналов. Основной проблемой является низкая разрешающая способность цифровых и аналоговых осциллографов. В аналоговых осциллографах низкая разрешающая способность обусловлена технологическими ограничениями создания электронно-лучевой трубки, в ЦЗО – разрешением системы аналого-цифрового преобразования. Далее будет приведена классификация методов повышения разрешающей способности ЦЗО, дан обзор существующих и новейших методов, перечислены достоинства, недостатки и приведены ограничения их применения.

Обзор технологий

Существующие методы повышения разрешающей способности ЦЗО можно разделить на программные, аппаратные и комбинированные (программно-аппаратные).

Первыми (доступными сейчас во многих, даже бюджетных ЦЗО) появились программные способы увеличения разрешения. Указанные методы построены на операции усреднения, к ним относят режим усреднения и технологию эквивалентного увеличения разрешения (в иностранной аббревиатуре ERES).

В режиме усреднения множественная выборка наблюдаемого сигнала усредняется по ансамблю с формированием сигнала для отображения. Достоинством режима усреднения является подавление некоррелированного триггерного шума и повышение разрешающей способности при наблюдении повторяющихся сигналов. Если в сигнале встречаются аномалии, то они также усредняются, влияя на результирующую осциллограмму, что является существенным недостатком данного метода. Режим усреднения применим только для повторяющихся и стабильных сигналов. Результаты измерений времени нарастания, длительности импульса и других параметров могут быть искажены из-за ограничения сигнала по спектру [1].

Технология эквивалентного увеличения разрешения позволяет повысить точность за счет низкочастотной фильтрации [2]. При этом вначале производится вычисление среднего амплитудного значения данных на последовательном дискретном интервале выборки (для каждого интервала), затем результат отображается. Данная технология реализуется только в случае избыточной дискретизации сигнала. В ЦЗО, производимых компанией Teledyne LeCroy (США), вычисление среднего значения последовательного дискретного интервала производится с помощью КИХ фильтра. В таблице 1 приведены показатели получаемого разрешения в зависимости от длины последовательного дискретного интервала выборки [3]. Достоинством технологии является потенциальная способность обеспечить три

¹ Кандидат технических наук, руководитель обособленного подразделения.

дополнительных бита разрешения даже при однократном измерении, недостатком - потеря высокочастотных составляющих сигнала из-за ограничения полосы пропускания.

Перечисленные выше программные методы повышения разрешающей способности применимы к ограниченному классу сигналов, что обусловило возникновение новых. Результатом разработки стала уникальная на момент анонсирования в 2012 году технология высокого разрешения HD4096.

Таблица 1

Дополнительное разрешение, бит	Сужение полосы пропускания по уровню -3 дБ, раз	Длина интервала, выборки
0,5	2	2
1	4,15	5
1,5	8,26	11
2	17,24	25
2,5	34,48	52
3	62,5	106

Таблица 2

Модель **	Разрешение АЦП, бит	Максимальная частота дискретизации (выборки/с)	Количество каналов	Стоимость*, доллары США
HMCAD5831	2	26G	1	\$2 129,98
AD9625-2500	12	2,5G	1	\$735,00
AD9625	12	2G	1	\$624,75
AD9484	8	500M	2	\$36,00
AD9211-300	10	300M	1	\$46,55

* Данные по стоимости на 15.09.2016 приведенные на сайте analog.com

** В таблице модели отсортированы по убыванию частоты дискретизации

Технология HD4096 построена на 12-битных аналого-цифровых преобразователях (АЦП) с высокой частотой дискретизации, применении системной архитектуры с низким уровнем собственного шума и входных усилителях с высоким значением «сигнал/шум». Разрешение по вертикали 12 бит обеспечивает $2^{12} = 4096$ уровней квантования, что увеличивает разрешение в 16 раз по сравнению со стандартными 8-битными ($2^8 = 256$) АЦП. Как следствие расширяется динамический диапазон входных сигналов, наблюдаемые сигналы более чистые (благодаря низкому шуму квантования) и четкие. Компания Teledyne LeCroy, разработавшая технологию HD4096, выпускает серию ЦЗО HDO 4000, HDO 6000, HDO 8000 с полосами частот до 1 ГГц. Недостатком технологии являются высокая стоимость и ограниченное применение: технология доступна только для сигналов с частотой ниже 1 ГГц. Причина ограничения по частоте – отсутствие у ведущих мировых производителей скоростных АЦП с приемлемым разрешением, причина высокой стоимости осциллографов высокого разрешения – высокая стоимость компонентов системы оцифровки сигнала. В таблице 2 приведены технические и стоимостные данные современных быстродействующих АЦП, опубликованные на официальном сайте Analog Devices (analog.com).

Лидеры в области цифровой осциллографии совместно с партнерами проводят разработку собственных АЦП, что позволяет создавать ВЧ и СВЧ осциллографы (до 100 ГГц реального времени). Так, компания Teledyne LeCroy, на протяжении многих лет использующая чипы 8-битных АЦП, в сентябре 2016 года анонсировала новую технологию HD1024. Технология HD1024 позволяет повысить разрешающую способность ЦЗО до 10 бит во всей полосе пропускания (4ГГц) при максимальной частоте дискретизации 40 ГГц.

Достичь таких результатов удалось путем изменения конфигурации чипа: отдельные блоки преобразования теперь смещены не только по фазе, но и по амплитуде (уровню квантования), что позволяет в зависимости от условий измерений обеспечивать оптимальное разрешение от 9 до 13,8 бит. Получаемая разрешающая способность в зависимости от полосы пропускания показана на рисунке.

Новая технология реализована в серии осциллографов HDO9000, которые, как и все семейство HDO от Teledyne LeCroy, обладают архитектурой с низким уровнем собственных шумов, обеспечивающих высокие показатели параметров ENOB. Характеристики осциллографов высокой точности серии HDO приведены в Таблице 3.

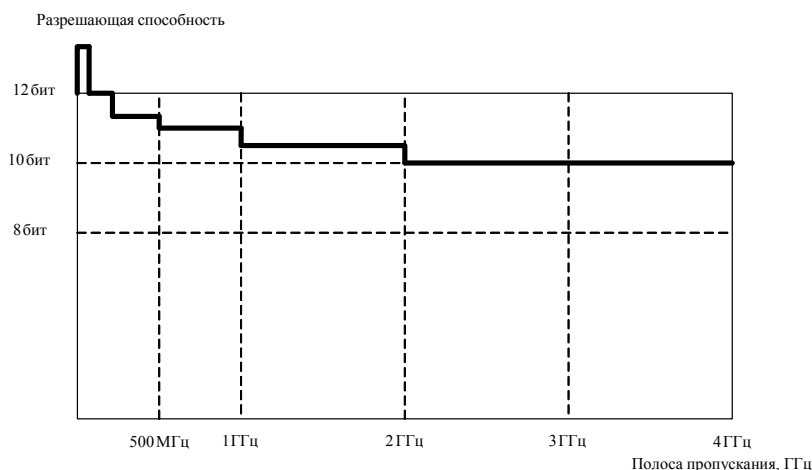


Рисунок - График зависимости разрешающей способности от полосы пропускания в технологии HD1024.

Таблица 3

Модель/параметр	HDO4000	HDO6000	HDO8000	HDO9000
Технология	HD4096 12 бит	HD4096 12 бит	HD4096 12 бит	HD1024 10 бит
Полоса	200 МГц – 1 ГГц	350 МГц – 1 ГГц	350 МГц – 1 ГГц	1 ГГц – 4 ГГц
Число каналов	2,4	4	8	4
Частота дискретизации	2,5 Гвыб/с	2,5 Гвыб/с	2,5 Гвыб/с	40 Гвыб/с

Технология HD1024, так же, как и технология HD4096, не имеет ограничений по типам сигналов, к которым они могут быть применены, что позволяет использовать осциллографы, реализованные на данных технологиях, в различных областях: для разработки, отладки и последующего сопровождения систем морского, речного, воздушного и наземного назначения.

Заключение

Проведение с малой погрешностью амплитудных измерений низковольтных сигналов переменного тока, наблюдаемых совместно с постоянной составляющей, а также высокочастотных сигналов становится возможным благодаря использованию технологий повышающих разрешающую способность цифровых запоминающих осциллографов.

Методы программного увеличения разрешения, основанные на усреднении, уменьшают полосу пропускания осциллографической системы. При этом режим усреднения показывает хорошие результаты при применении к повторяющимся сигналам, однако не применим к неповторяющимся и нестабильным сигналам, и может исказить результаты измерений времени нарастания, периода, частоты и пр. Эквивалентное увеличение разрешения (ERES) эффективно как для нормального режима сбора так для однократного.

Технология аппаратного увеличения разрешения HD4096 предоставляет возможность повысить разрешение до 12-бит для сигналов с частотой, не превышающей 1 ГГц. Комбинированная технология HD1024 позволяет в зависимости от условий измерения обеспечивать оптимальное разрешение от 9 до 13,8 бит, при этом гарантированно обеспечивая 10 бит разрешения в пределах полосы частот 4 ГГц с максимальной частотой дискретизации 40 ГГц. Обе технологии позволяют повысить динамический диапазон наблюдения и наблюдать более четкие и чистые сигналы.

Таким образом, рассмотренные технологии повышения разрешающей способности имеют преимущества и ограничения, которые следует учитывать при их использовании.

Литература

1. Корнеев, С. А. Решение проблем с шумами осциллографа при проведении точных измерений. // Компоненты и технологии, 2012, №3.-С. 80-83.
2. Дедюхин, А. А. Исследование сигналов с применением спектрального анализа цифровых осциллографов. Эквивалентная дискретизация цифровых осциллографов LeCroy. Интернет-ресурс: http://www.prist.ru/info/articles/sa_dpo.htm.
3. Teledyne LeCroy. Application note AN006A. Enhanced Resolution. // Замечания по применению. Интернет-ресурс : <http://teledynelecroy.com>.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАБОТУ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С «ОБРАЩЕННЫМ ДАТЧИКОМ СИЛЫ»

Е. Э. Аман¹, А. И. Скалон²

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт – Петербург, РФ, e-mail: Anhelena7@gmail.com

Аннотация

Ключевые слова: магнитное поле, магниты, магнитные экраны, микромеханика

Особенностью АММА ОДС является датчик силы, основные элементы которого: полюсные наконечники магниторохода, плоские катушки с током и магнитный слой подвижного элемента. Прибор предназначен для измерения линейного ускорения и работы в СУ ПО. Из-за наличия магнитных элементов необходимо учитывать влияние внешнего магнитного поля, так как оно способно серьезно помешать работе датчика и привести к неточным результатам измерения. Во избежание этого необходимо применить экран, который будет способен ослабить или же свести на нет вредные влияния внешнего магнитного поля на ЧЭ датчика. Работа посвящена исследованию влияния магнитного поля на элементы ДС и разработке магнитного экрана.

В настоящее время создан большой типоряд микромеханических акселерометров для различных областей применения, однако их характеристики находятся на некотором среднем уровне по сравнению с приборами типа А-15, А-17 (РПКБ), АТ-1104 (Темп Авиа). В данной статье приводятся материалы аналитических исследований возможности создания ММА с характеристиками, приближающимися к характеристикам названных выше приборов систем управления и различных информационно-измерительных системах.

Возбуждение автоколебаний осуществляется путем введения в контур обратной связи прибора звена с существенно нелинейной характеристикой, что позволяет при дальнейшем анализе не рассматривать другие менее значимые нелинейности. При этом структурная схема может быть представлена в виде, показанном на рисунке 1, с разделением на линейную и нелинейные части.

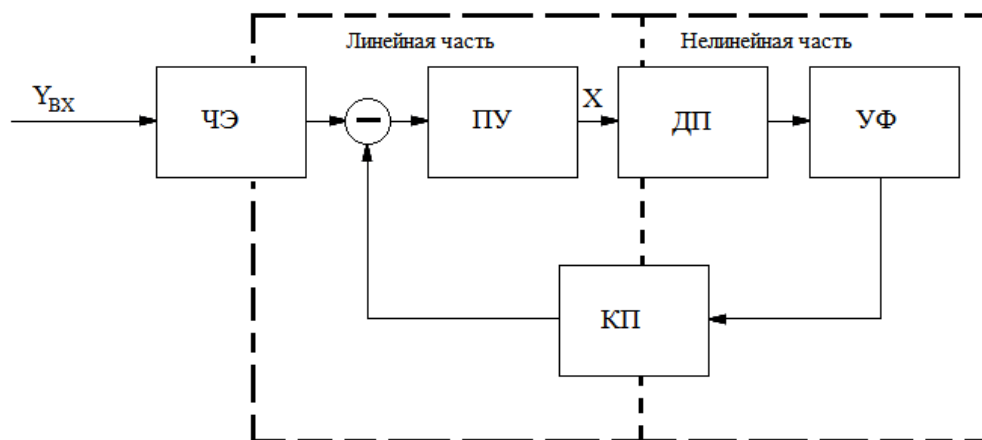


Рисунок 1 - Структурная схема автоколебательного датчика.

Чувствительный элемент (ЧЭ) обеспечивает взаимодействие датчика с измеряемой физической величиной $Y_{вх}$ (процессом) и формирует входное воздействие $F_{вх}$, прикладываемое к ПУ (инерционной массе на упругих подвесах). Силовая обратная связь формирует компенсирующее воздействие $F_{кп}$, которое из-за наличия релейного элемента, формируемого на основе датчика положения (ДП) и усилителя-формирователя (УФ), имеет импульсную форму. Автоколебания ПУ поддерживаются поступлением энергии от некоторого источника, которое регулируется движением самой системы. При этом силы, создаваемые компенсирующим преобразователем (КП), будут иметь знакопеременный характер, вызывающий колебания ПУ [1], с достаточно низкой частотой (200 – 500) Гц, что с точки зрения прочности упругих элементов эквивалентно резонансным колебаниям, реализуемым в существующих ММА.

На рисунке 2 представлена конструктивно-кинематическая схема ММА «обращенной» схемы, где показаны:

¹ Аспирант.

² Доктор технических наук, профессор.

- а) - инерционная масса (ИМ, выполненная из кремния с нанесенным покрытием из магнитотвердого материала (например, Sm-Co) [2] и представляющая собой постоянный магнит,
- б) - плоские катушки с током,
- в) - крышка и основание прибора с полюсными наконечниками, являющимися магнитопроводом,
- г) - инерционная масса, закрепленная на упругих элементах, совершает автоколебания вдоль оси ОХ [2].

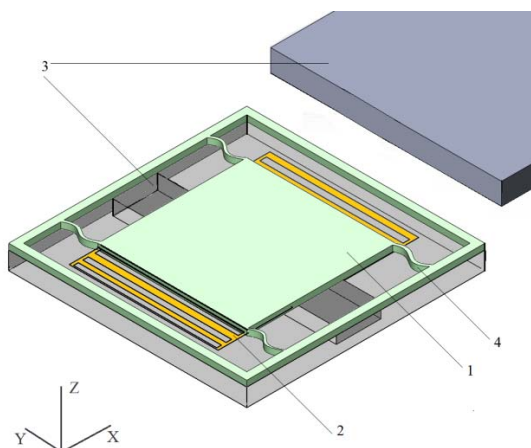


Рисунок 2 - Конструктивно-кинематическая схема АММА ОДС

Согласно приведенной на рисунке 2 структурной схеме автоколебательного датчика видно, что система является принципиально нелинейной. В зависимости от реализуемой схемы набор элементов (звеньев) может быть различным. Однако, рассматриваемая система может быть отнесена к нелинейным автоматическим системам первого класса. [3], собственное движение которых описывается дифференциальным уравнением вида:

$$Q(p) + R(p)\Phi(x, px) = 0, \quad (1)$$

где $Q(p)$ и $R(p)$ – операторные многочлены любой степени с вещественными постоянными коэффициентами, $\Phi(x, px)$ – нелинейная функция. При использовании метода гармонической линеаризации нелинейная функция может быть представлена в виде $\Phi(x, px) = qx + q'px$, где коэффициенты q и q' зависят от вида нелинейности [3].

Метод гармонической линеаризации особенно удобен для исследований автоколебательных систем, поскольку физические предпосылки, заложенные в основу метода, базируются именно на наличии периодического сигнала на входе нелинейной части системы.

Таким образом, уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$[(T_2 p + 1)(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1) + k_{ДС}(q + q'p)]x = 0,$$

где

$$T_1 = \sqrt{\frac{m}{c_x}} \quad \xi = \frac{\mu_x}{2\sqrt{mc_x}}, \quad K_{ДС} = \frac{F_A}{U_{ДСм}} \quad T_2 = \frac{L}{R}.$$

T_1 – постоянная времени колебательного звена, T_2 – постоянная времени ДС, ξ – коэффициент затухания.

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (n \cdot l + 2b_0) \cdot \left(\ln \frac{4l}{b} - 0,75 \right)$$

$$R = \frac{\rho \cdot (n \cdot l + 2b_0)}{b \cdot h}$$

ρ – удельное сопротивление материала токопроводящей дорожки.

Очевидно, что в рассматриваемой конструктивной схеме наиболее важным элементом является «обращенный» датчик силы (ОДС).

Основными параметрами ДС магнитоэлектрического типа являются: индукция B постоянного магнита и сила тока I , протекающего по катушкам. Движение пластины инерционной массы происходит в горизонтальной плоскости в направлении оси ОХ под действием силы Ампера [2].

Индукцию, создаваемую пластиной постоянного магнита, намагниченной по длине, можно найти по известным параметрам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1. Параметры компенсирующего преобразователя

Параметр	Значение параметра
Длина пластины магнита, l , м	$5 \cdot 10^{-3}$
Площадь поверхности магнита, S , м ²	$25 \cdot 10^{-6}$
Зазор между полюсным наконечником и ИМ, Δ , м	$20 \cdot 10^{-6}$

При расчете магнитной индукции можно не учитывать проводимость утечек с боковых поверхностей и ребер полюсов, в силу малой величины зазора и учитывая диамагнитную природу кремния. Следует учитывать «действительную» длину магнита, приняв его центральную часть ($1/3l$) - нейтральной. [4].

Таким образом, проводимость зазора определяется соотношением [4].

$$G_{\delta} = \mu_0 \cdot \mu \cdot S / \Delta,$$

при этом отношение магнитной индукции к напряженности магнитного поля выбранного магнита определяется как

$$B/H = G_{\delta} l / S = \mu_0 \cdot \mu \cdot l / \Delta.$$

Более детальный анализ распределения индукции магнитного поля в зазоре был проведен имитационным моделированием в программной среде ELCUT. Результаты представлены на рисунке 3.

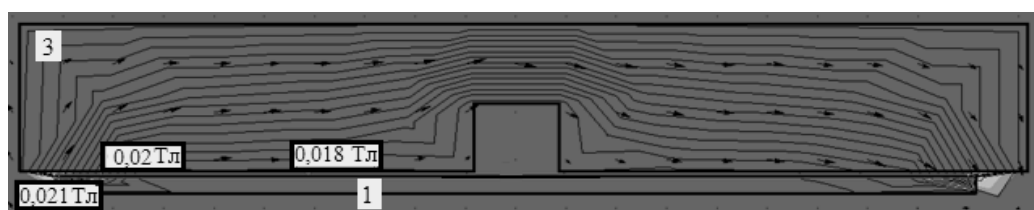


Рисунок 3 - Распределение магнитного поля в ОДС

На рисунке 4 показан фрагмент распределения магнитного поля под полюсным наконечником ОДС.

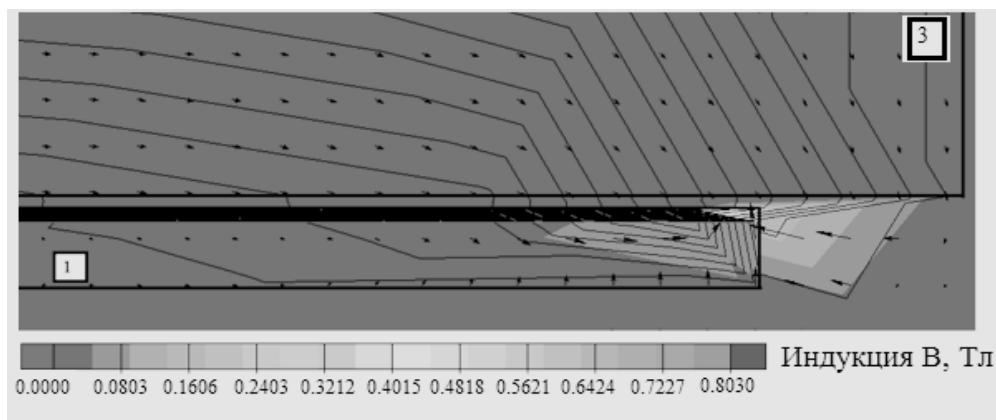


Рисунок 4 - Фрагмент распределения магнитного поля под полюсным наконечником ОДС.

При воздействии на АММА ОДС магнитным полем будут отмечаться изменения выходного сигнала вплоть до полного прекращения автоколебаний, в силу наличия магнитных элементов в конструкции. [2] Величина индукции магнитного поля постоянно увеличивается в ходе эксперимента, что позволяет оценить работу датчика без применения магнитного экрана.

Согласно ГОСТ 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93) «Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты» и ИЕС/EN 61000-4-8 для обеспечения работоспособности в условиях эксплуатации устройства существует стандарт требований, приведенный на рисунке 5.

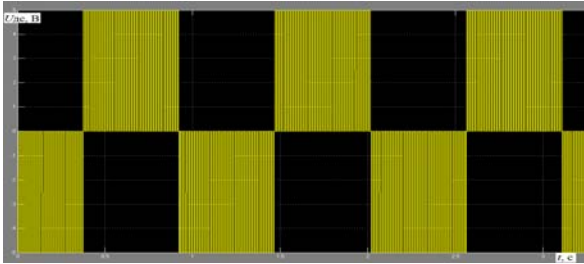
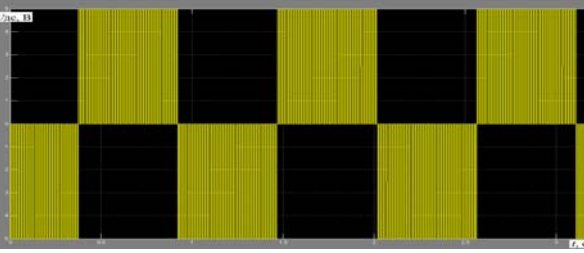
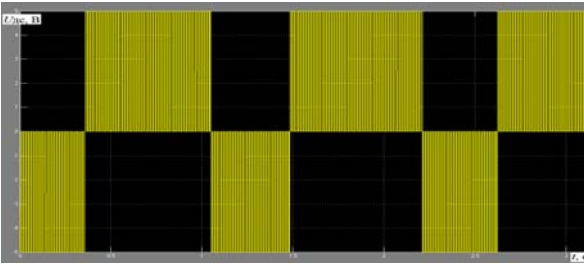
Степень жесткости испытаний	Напряженность МППЧ, А/м	
	непрерывное магнитное поле	кратковременное магнитное поле (продолжительность 1-3 с)
1	1	Не применяют
2	3	То же
3	10	"
4	30	300
5	100	1000
*	Напряженность магнитного поля - по согласованию между производителем и потребителем	

Рисунок 5 - Таблица степеней жесткости испытаний на устойчивость к МППЧ. [ГОСТ 50648-94]

Для исследования устройства в условиях отсутствия магнитного экрана можно применить условия, указанные на рисунке 1, с учетом отсутствия внешнего воздействия в виде ускорения.

Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 2. Результаты испытаний ЧЭ АММА ОДС.

<p>Первая степень жесткости, длины импульсов неизменны, условия эксплуатации: вблизи чувствительных приборов, использующих электронные лучи (мониторы, электронные микросхемы и др.).</p>	
<p>Вторая степень жесткости, изменение длины импульсов имеется и способно влиять на работу прибора, условия эксплуатации: бытовые зоны, зоны учреждений, больниц, удаленные от электрических заземляющих проводников, зоны промышленных предприятий, высоковольтных подстанций.</p>	
<p>Третья степень жесткости, значительное изменение длины импульсов, существенно влияет на ЧЭ прибора, условия эксплуатации: коммерческие зоны, центры управления, зоны предприятий, не относящихся к тяжелой промышленности, компьютерные залы высоковольтных электрических подстанций.</p>	

Экраны многослойной конструкции применяются в том случае, когда необходимо значительное экранирующее действие. Слои экрана, преимущественно, представляют собой чередование магнитных (напр., пермаллой) и немагнитных (напр., медь) материалов. Особенностью таких многослойных экранов является высокая экранирующая эффективность и сравнительно малые потери энергии в экране. Эти преимущества объясняются следующим образом. При рассмотрении однослойных экранов было установлено, что экранирующий эффект определяется совместным действием экранирования поглощения $K_{зп}$ и экранированием отражения $K_{зо}$ на границах диэлектрик – металл – диэлектрик. Эффект отражения обусловлен несоответствием волновых характеристик сопрягаемых сред, и чем больше это несоответствие, тем больше экранирующее действие. В данном случае энергия внешнего (вредного)

магнитного поля, встречая на своем пути такое электрическое несоответствие, частично отражается и частично проходит в экранированное пространство. Это является исходной точкой в конструировании многослойных экранов. Комбинирование металлов с различным волновым сопротивлением Z_M , позволяет создать целую систему многократных отражений, обеспечивая лучшую степень экранирования. [5]

Конструкции экранов имеют три широко применяемые разновидности: Плоские, цилиндрические и сферические. Коэффициент экранирования для любого из них можно найти по формуле

$$K_3 = \frac{1}{\operatorname{ch}kt} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(N + \frac{1}{N} \right) \operatorname{th}kt}, \quad (2)$$

где $N = Z_d/Z_3$. Разница лишь в величине волнового сопротивления, входящего в параметр N . Сопоставляя значения волновых сопротивлений диэлектрика плоского, цилиндрического и сферического получается отметить, что они выражаются соотношением $Z_d^n : Z_d^c : Z_d^s = 1 : 2 : 3$, следовательно, $K_3^n : K_3^c : K_3^s = 1 : 1/2 : 1/3$, то есть коэффициент экранирования шара в три раза больше у шара, цилиндра - в два. Оптимальным выбором в данном случае оказывается шар, ведь замыкание силовых линий магнитного поля в данной конструкции работает максимально эффективно, однако, конструкция экрана кубической формы позволяет использовать данные преимущества.

Эффективность экранирования (коэффициент экранирования) однослойного магнитостатического экрана может быть определена как отношение напряженностей магнитного поля в отсутствии экрана и при его наличии, т. е. в виде

$$K_3 = \frac{H_{п.}}{H_{п.э.}}, \quad (3)$$

где $H_{п.}$ — напряженность магнитного поля при отсутствии экрана; $H_{п.э.}$ — напряженность магнитного поля помех при наличии экрана.

Величина может быть определена в зависимости от свойств экрана следующим образом:

$$K_3 = 1 + \frac{0,66\mu t}{r_3}, \quad (4)$$

где μ — начальная магнитная проницаемость материала экрана; t — толщина стенок экрана; r_3 — радиус сферы, имеющей тот же объем, что и объем наружной поверхности экрана.

Из этой формулы следует, что коэффициент экранирования повышается с толщиной стенок экрана, как об этом говорилось выше. Однако при необходимых значениях K_3 , толщина стенок может оказаться настолько большой, что целесообразнее применить экран из нескольких слоев.

Расчет эффекта экранирования или коэффициента экранирования в диапазоне частот от 10 до 200 Гц при помощи магнитного экрана может быть выполнен в предположении, что внешнее поле помех по интенсивности и структуре не меняется за счет действия экрана и поле остается таким же, каким оно было до введения в него экрана. В действительности же, внесение экрана во внешнее поле помех существенным образом меняет его интенсивность и структуру.

$$K_3 = \frac{\Phi_{п.}}{\Phi_{п.э.}} = 1 + \frac{R_{м.в.}}{R_{м.э.}}. \quad (4)$$

Чтобы определить коэффициент экранирования был смоделирован профиль экрана, заданы параметры магнитной проницаемости для сред пермаллой, воздух и медь, так же был задан вектор магнитной индукции внешнего поля значением $5 \cdot 10^{-5}$.

Эффективность однослойного экрана из пермаллоя заметно снижается, экран, конструкцией (медь-пермаллой-медь-пермаллой-медь) так же менее эффективен в условиях магнитного поля.

Формула расчета затухания экранирования магнитного и электрического полей:

$$A_3 = \ln|\operatorname{ch}k_M t| + \ln|1 + 0,5(Z_d/Z_M)\operatorname{th}k_M t|, \quad (5)$$

где $k_M = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ - коэффициент распространения в металле, коэффициент вихревых токов, $Z_M = \sqrt{i\omega\mu/\sigma}$ - волновое сопротивление металла, t - толщина экрана, $Z_d = i\omega\mu r_3$ - волновое сопротивление диэлектрика (воздух) для магнитного поля, μ - относительная магнитная проницаемость, r_3 - радиус экрана (эквивалентной сферы), σ - удельная проводимость (1/Ом), ω - круговая частота магнитного поля в радианах ($\omega = 2\pi f$, где f - частота м.п., Гц). Кроме того, для постоянного тока и низких частот (до 10^3 Гц) затухание энергии в толще экрана весьма мало. В этой частотной зоне

$$k_M t \leq 0,25, \operatorname{ch}k_M t \rightarrow 1, \operatorname{th}k_M t \approx k_M t.$$

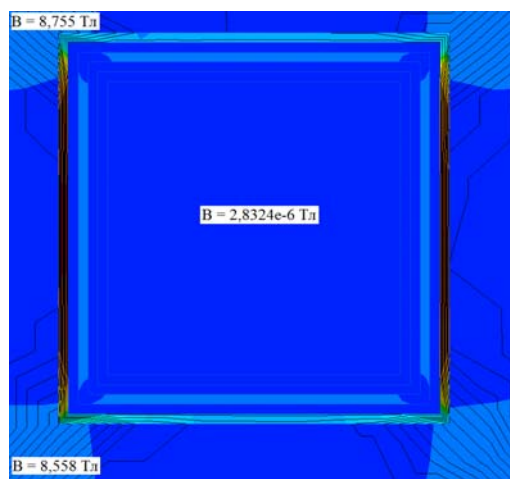


Рисунок 6 - Экран п-м-п-м-п в магнитном поле частотой 50 Гц, величиной 10 Тл.

При расчете экранирования магнитного поля следует учитывать особенности экранирования немагнитных (медь, алюминий, свинец) и магнитных (пермаллой, феррит, сталь) экранов, для которых $Z_d/Z_m > Z_m/Z_d$ и $Z_m/Z_d > Z_d/Z_m$, соответственно. Тогда затухание

$$\begin{aligned} \text{для магнитных экранов } A_3 &= \ln|1 + \mu t/2r_3|, \\ \text{для немагнитных экранов } A_3 &= \ln|1 + k_m^2 r_3 t/2|. [5] \end{aligned}$$

Затухание в двухслойном экране может быть рассчитано

$$A_{1,2} = \ln \left| \frac{1 - P_1 P_2}{K_{31} K_{32}} \right| = A_{п12} + A_{о12}, \quad (6)$$

где $A_{п12}$ – затухание поглощения двухслойного экрана, $A_{о12}$ – затухание отражения двухслойного экрана.

Коэффициент экранирования пятислойного экрана выбранной конструкции будет равен $A_\Sigma = \ln(1/K_{34})$.

Экранирующий эффект конструируемого многослойного экрана обусловлен суммарным действием затухания поглощения (пермаллой) и затуханием отражения (медь).

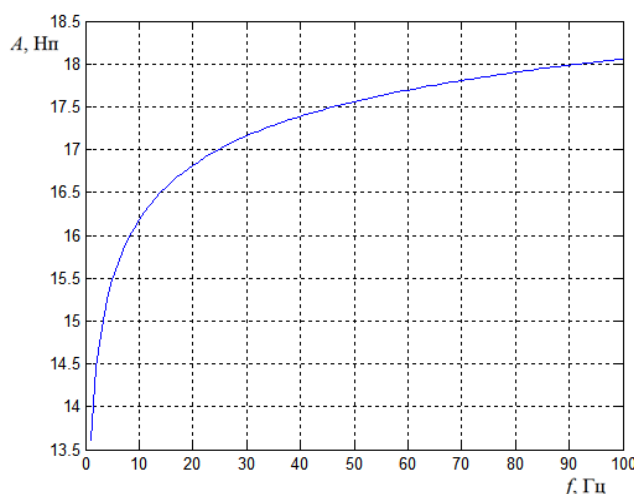


Рисунок 7 - Зависимость коэффициента затухания экрана конструкции п-м-п-м-п от частоты магнитного поля

Решающее значение имеет материал, из которого изготовлен экран, толщина его стенок и радиус. Малое влияние формы экрана является весьма ценным обстоятельством, так, например, в случае, когда все измерения длин сторон экрана оказываются равны, его радиус можно легко определить как радиус эквивалентной сферы. Магнитостатический экран действует по принципу замыкания магнитного потока в толще экрана. Чем меньше сопротивление этому потоку, тем эффективнее экран.

Согласно ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. Технические требования и методы испытаний» и IEC/EN 61000-4-8 до установки магнитного экрана АММА ОДС должен пройти испытания 2 степени жесткости, после установки – 5 степени жесткости.

Литература

1. Пат. 2410701 Российская Федерация G01P 15/00. Линейный микроакселерометр / Григорьев А. В., Калаурный Я. Н., Скалон А. И.: заявитель и патентообладатель СПб ГУАП - № 2009125120/28; заявл. 30.06.09; опубл. 27.01.11, Бюл. № 3. – 8 с. : ил.
2. Пат. 2509307 Российская Федерация, G01P15/11. Линейный акселерометр / Аман Е. Э., Напольская Н. В., Скалон А. И. ; заявитель и патентообладатель СПб ГУАП - № 2012125448/28; заявл. 19.06.12 ; опубл. 10.03.14, Бюл. № 7. - 4 с. : ил.
3. Пальтов, И. П., Попов, Е. П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. – М: Физматгиз, 1960. 792 с., ил.
4. Арнольд, Р. Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами, М., «Энергия», 1969. 178 с., ил.
5. Гроднев, И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. - М.: «Связь», 1972. - 112 с., ил.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТЕРМОСТОЙКИХ ЭМАЛЕЙ ДЛЯ ВОЗМОЖНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В СУДОСТРОЕНИИ

С. Л. Брилин¹, И. Е. Карпова²

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», г. С.-Петербург, РФ,
e-mail: ¹s-b-l@mail.ru, ²struevvp@krylov.spb.ru

Аннотация

Ключевые слова: степень черноты (излучательная способность), Фурье-спектрометр

Уровень теплового излучения, который воспринимается системами обнаружения, работающими в инфракрасном диапазоне длин волн, определяется температурой, площадью и излучательной способностью (степенью черноты) поверхностей корпуса судна.

Степень черноты e – это отношение собственного излучения тела к энергии излучения абсолютно черного тела при одной и той же температуре и может изменяться в пределах от 0 до 1. При фиксированной температуре величина e зависит от длины волны, структуры поверхности, геометрии, угла визирования.

Существует несколько способов экспериментального определения степени черноты. Одним из них является метод Фурье-спектроскопии. Основным элементом оптической схемы Фурье-спектрометра является двухлучевой интерферометр Майкельсона, состоящий из полупрозрачного светоделителя и двух плоских зеркал. Фурье-спектрометр позволяет получить информацию о спектральном составе ИК-излучения и оптических свойствах исследуемых образцов.

Авторами были проведены измерения степени черноты двух образцов, покрытых эмалью, которые после проведенных исследований могут быть рекомендованы для покраски судов.

Испытуемыми образцами являются:

- а) Образец № 1 – металлическая пластина, размером 2 x 6 см, покрытая термостойкой эмалью «Церта», светло-серого цвета.
- б) Образец № 2 – металлическая пластина, размером 2 x 6 см, покрытая термостойкой эмалью «Церта», темно-серого цвета.

Обе эмали изготовлены ООО НПП «Спектр», Россия, Чувашская Республика, г. Новочебоксарск. Измерения выполнялись на Фурье-спектрометре ФСМ 1202 в диапазоне ИК-спектра от 8 до 14 мкм при температуре окружающего воздуха 23 °С. На рис. 1 представлен стенд для измерения степени черноты поверхности исследуемых образцов с помощью Фурье-спектрометра ФСМ 1202.

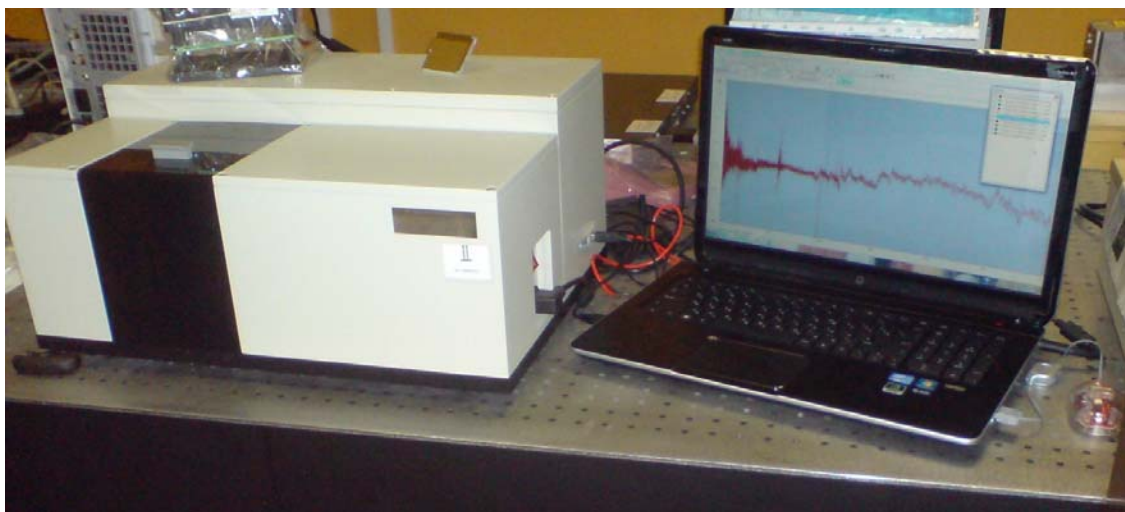


Рисунок 1 – Стенд для измерения степени черноты поверхности исследуемых образцов с помощью Фурье-спектрометра ФСМ 1202

Порядок выполнения работы на Фурье-спектрометре.

I. Измерение спектра отражения:

- а) Запускаем программу *FSpec*.
- б) Устанавливаем в кюветном отделении спектрометра приставку зеркального отражения.
- в) Появляется запрос «Установите образец сравнения».

¹ Инженер 2 категории.

² Ведущий инженер.

- г) Устанавливаем зеркало в качестве образца сравнения.
- д) Появляется запрос «Установите измеряемый образец».
- е) Устанавливаем измеряемый образец.
- ж) Получаем спектр отражения.

II. Измерение спектра пропускания:

- а) Запускаем программу *FSpec*.
- б) Устанавливаем в кюветном отделении спектрометра приставку пропускания без исследуемого образца.
- в) Появляется запрос «Установите образец сравнения» (в данном случае образцом сравнения является воздух).
- г) Появляется запрос «Установите измеряемый образец».
- д) Устанавливаем измеряемый образец.
- е) Получаем спектр пропускания.

Полученные результаты сохраняем в формате *.spe*.

Как известно из закона Кирхгофа при термодинамическом равновесии поглощательная способность и степень черноты тела численно равны между собой, поэтому степень черноты тела определяется через коэффициент отражения R_λ и коэффициент пропускания D по формуле:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - R_\lambda - D_\lambda.$$

Измерения коэффициентов отражения R и коэффициентов пропускания D проводились при углах визирования 10° , 45° и 80° . Результаты измерений представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Образец № 1

Угол визирования $\varphi, ^\circ$	Коэффициент отражения $R, \%$	Коэффициент пропускания $D, \%$	Степень черноты $\varepsilon, \%$
10	7,5	1	91,5
45	8,7	1	90,3
80	29	2	69

Таблица 2 – Образец № 2

Угол визирования $\varphi, ^\circ$	Коэффициент отражения $R, \%$	Коэффициент пропускания $D, \%$	Степень черноты $\varepsilon, \%$
10	2	1	97
45	3	1	96
80	29	2	69

Результаты измерений образца № 1 с помощью Фурье-спектрометра показали, что в диапазоне ИК-спектра (от 8 до 14 мкм) при различных углах визирования от 10° до 80° коэффициент отражения составляет от 0,075 до 0,29; коэффициент пропускания – от 0,01 до 0,02; степень черноты составляет от 0,915 до 0,69.

Результаты измерений образца № 2 с помощью Фурье-спектрометра показали, что в диапазоне ИК-спектра (от 8 до 14 мкм) при различных углах визирования от 10° до 80° коэффициент отражения составляет от 0,02 до 0,29; коэффициент пропускания – от 0,01 до 0,02; степень черноты составляет от 0,97 до 0,69.

Проведенные измерения степени черноты двух термостойких эмалей показали, что образец № 1 имеет, по сравнению с образцом №2, более низкую степень черноты, поэтому может быть рекомендована для использования в судостроении.

Литература

1. Михеев, М. А., Михеева, И. М. Основы теплопередачи. - Ленинград: Изд-во «Энергия», 1977, 344 с.
2. Р. Дж. Белл. Введение в фурье-спектроскопию. – Москва: М., Мир, 1975, 382 с.
3. Тарасов, К. И. Светосильные спектральные приборы. – Ленинград: М., Наука, 1988, 263 с.

МЕГАОММЕТР ЦИФРОВОЙ ПЕРЕНОСНОЙ ЦМ1255

И. Н. Попов

АО «Приборостроительный завод «ВИБРАТОР», г. С.-Петербург, РФ,
e-mail; ignikpopov@yandex.ru, тел. 8-812-598-92-00

Аннотация

Ключевые слова: мегаомметр, сопротивление изоляции, электрическая сеть

Мегаомметр ЦМ1255 - переносной измерительный прибор с автономным питанием, предназначенный для контроля сопротивления изоляции электрических сетей различного рода тока, находящихся под рабочим напряжением, или обесточенных.

Рассматриваются различные методы измерения сопротивления изоляции электросетей, описывается функциональная схема прибора и приводятся его основные технические характеристики.

Введение

Обеспечение надёжного и безопасного функционирования электроэнергетических объектов является весьма актуальной задачей.

Такие объекты могут подвергаться различного рода внешним воздействиям, приводящим к ухудшению их технического состояния. Наиболее безопасными являются электросети, изолированные от земли, но только при условии, что их изоляция находится в исправном состоянии. Отсюда вытекает потребность в постоянном контроле сопротивления изоляции таких сетей.

Завод «ВИБРАТОР» уже много лет производит мегаомметры, предназначенные для работы на судах, кораблях и подводных лодках. К ним относятся щитовые круглошкальные приборы со стрелочным отсчётом типа М1423, М1623, предназначенные для контроля сетей переменного тока [1] и М1428, М1628 - для контроля сетей любого рода тока [2]. К сожалению, эти приборы не имеют цепей сигнализации об аварийном снижении сопротивления изоляции контролируемых сетей.

В последнее время были созданы и освоены в производстве универсальный цифровой мегаомметр ЦМ1628.1 с релейной сигнализацией [3] и многоканальный измеритель ИСИМ1623 [4]. Эти приборы сделаны на основе микроконтроллеров, имеют интерфейсы RS-485 и CAN-2В соответственно и могут применяться в системах управления электроснабжением.

Все эти приборы являются стационарными, в то время как возникла потребность в переносном приборе с цифровым отсчётом, способном оперативно проверить изоляцию электросетей, находящихся под рабочим напряжением. Для этого и был разработан мегаомметр ЦМ1255.

Прибор создавался по программе импортозамещения и имеет свидетельство об утверждении типа средства измерения военного назначения.

1 Обзор методов измерения сопротивления изоляции

Существуют способы определения сопротивления изоляции, в которых в качестве измерительного напряжения используется напряжение самой сети. Это позволяет обходиться без дополнительного источника напряжения, но невозможно проводить измерения в обесточенных сетях, кроме того, нестабильность напряжения в сети влияет на точность измерений [5].

При использовании дополнительного источника измерительного напряжения постоянного тока возможно проводить измерения в сетях любого рода тока и обесточенных. Измерительное напряжение подаётся в любую точку контролируемой сети через ограничительный резистор [1], или, в трёхфазных сетях, в каждый провод через асимметр, представляющий собой три одинаковых резистора, или дросселя, соединённых в звезду и подключаемый к трём фазным проводам сети [5].

В приборах, предназначенных для измерений в сетях любого рода тока, для устранения влияния постоянной составляющей напряжения сети на результаты измерений, можно использовать балансировочный потенциометр, подключённый к выходу выпрямителя, а измерительное напряжение подавать на подвижный контакт потенциометра [2]. Сопротивление потенциометра вносит погрешность в результат измерения, поэтому оно должно быть минимальным и ограничивается его мощностью. Измерения выполняют в два приёма: сначала потенциометром балансируют сеть, добиваясь отсутствия тока на входе прибора, после чего подают измерительное напряжение и после стабилизации показаний снимают отсчёт.

Более совершенным можно считать способ измерения, основанный на поочерёдном воздействии на контролируемую сеть разнополярным измерительным напряжением. Сопротивление изоляции вычисляется как результат деления разности измеренных напряжений сети относительно земли на разность измеренных токов [5].

2 Выбор метода измерений

При выборе метода измерений учитывалось что это переносной прибор, следовательно, он должен быть по возможности лёгким и компактным, с низким энергопотреблением, удобным в эксплуатации, надёжным и ремонтпригодным. Цифровой отсчёт подразумевает использование микроконтроллера, который также может осуществлять управление процессом измерения, преобразовывать в цифровую форму сигналы токов и напряжений, вычислять результаты измерений и отображать их на панели индикации.

Понятно, что прибор должен иметь источник измерительного напряжения, для реализации возможности работать в сетях любого рода тока, в том числе и обесточенных.

На этапе макетирования была проверена схема с использованием наиболее простого однополярного источника измерительного напряжения. Измерение выполнялось в два такта. Сначала к сети подключался прибор с выключенным источником измерительного напряжения. Под влиянием его входного сопротивления (50 кОм) происходил перезаряд ёмкости сети, после чего измерялся входной ток прибора $I_{ВХ}$, а также напряжением ЦАП микроконтроллера компенсировался сигнал напряжения сети относительно земли U_C на входе схемы измерения этого напряжения. Это было сделано с целью сужения динамического диапазона входного сигнала усилителя для увеличения точности измерений. Затем подавалось измерительное напряжение порядка 50 В и, после перезаряда емкости сети, измерялось второе значение $I_{ВХ}$ и приращение напряжения сети относительно земли. По полученным данным вычислялось сопротивление изоляции $R_{ИЗ}$:

$$R_{ИЗ} = \frac{\Delta U_C}{\Delta I_{ВХ}} \quad (1)$$

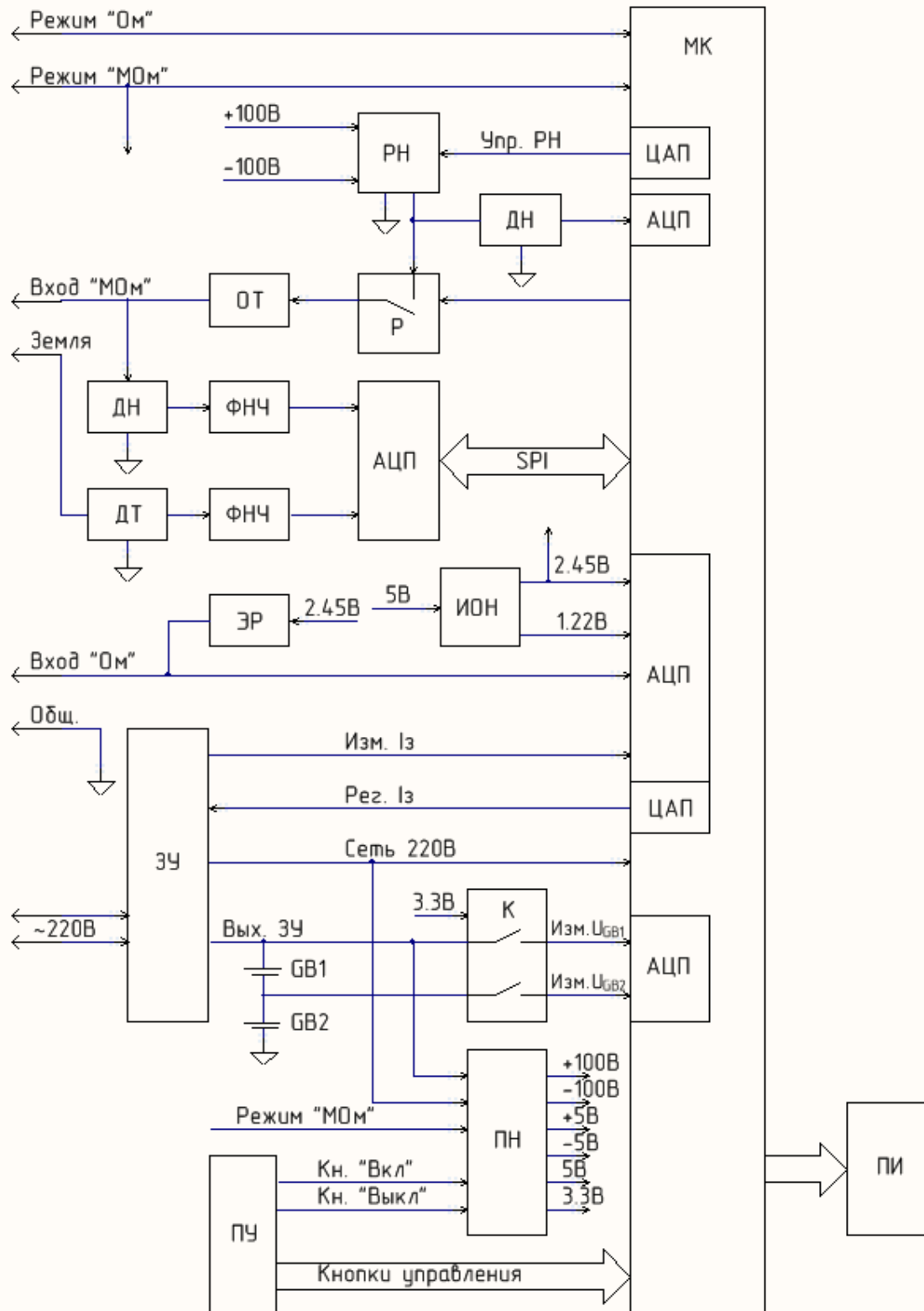
где: ΔU_C – разность напряжений сети относительно земли между тактами измерения;
 $\Delta I_{ВХ}$ – разность измеренных входных токов между тактами.

В ходе работы выявились недостатки метода. В основном они были связаны с компенсацией напряжения сети. Исходя из возможностей микроконтроллера (разрешённый к применению в изделиях спец. назначения ATmega128A) ЦАП был реализован на двух 8-разрядных таймерах с ШИМ для грубой и точной компенсации. Наличие в схеме регулирования RC-фильтра при условии нестабильности напряжения в контролируемой сети приводило к большой длительности процесса компенсации. Кроме того, простая схема однополярного источника измерительного напряжения работала только при одном направлении протекания тока, что ограничивало возможности управления процессом перезаряда ёмкости сети.

В итоге был реализован другой метод измерения с использованием двухполярного регулируемого источника измерительного напряжения с тотемным выходом, что позволило, за счёт изменения полярности прикладываемого к сети напряжения, в два раза увеличить ток перезаряда ёмкости сети при том же значении измерительного напряжения, а также контролировать процесс перезаряда, сократив его время за счёт управляемого снижения измерительного напряжения до момента стабилизации тока утечки. Прибор выполнен на базе микроконтроллера ATxmega256A3U.

3 Функциональная схема мегаомметра

Функциональная схема прибора приведена на рисунке 1.



ДН – делитель напряжения; ДТ – датчик тока; ОТ – ограничитель тока; ФНЧ – фильтр нижних частот; ЭР – эталонный резистор; ЗУ – зарядное устройство; ПУ – панель управления; РН – регулятор напряжения; Р – реле; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; GB1, GB2 – аккумуляторы; ИОН – источник опорного напряжения; К – коммутатор; ПН – преобразователь напряжения; МК – микроконтроллер; ПИ – панель индикации.

Рисунок 1 – Функциональная схема мегаомметра ЦМ1255

3.1 Измерение сопротивления изоляции

Для измерения сопротивления изоляции к измерительному входу прибора подключают кабель с маркировкой «МОм». Провод кабеля с обозначением «Земля» подключают к шине заземления, а второй провод – к любой точке контролируемой сети, после чего включают прибор кнопкой «Вкл» на панели управления ПУ. Если аккумуляторы GB1 и GB2 заряжены, включается импульсный преобразователь напряжения ПН и прибор запускается в режиме мегаомметра (режим измерения «МОм»). Запуск однократного или непрерывных измерений осуществляется соответствующей кнопкой. МК устанавливает на выходе РН уровень измерительного напряжения порядка плюс 80 В и включает оптоэлектронное реле Р. Через ограничитель тока ОТ (цепочка резисторов с суммарным сопротивлением 50 кОм) протекает ток, перезаряжающий ёмкость сети. Текущие уровни напряжения сети относительно земли и тока утечки, снимаемые с делителя напряжения ДН и датчика тока ДТ (низкоомный резистор) через фильтры нижних частот ФНЧ поступают на входы двухканального аналого-цифрового преобразователя АЦП и, после оцифровки, по шине SPI выдаются в МК. По окончании перезаряда ёмкости сети МК фиксирует в памяти измеренные значения. Если процесс перезаряда затягивается дольше установленного времени (60 с), то измерения заканчиваются по таймеру.

На втором такте цикла измерения изменяется полярность измерительного напряжения и весь процесс повторяется, после чего по формуле (1) вычисляется сопротивление изоляции и результат выводится на панель индикации ПИ. На этом однократное измерение заканчивается.

Если выполняются непрерывные измерения, то отсчёты на ПИ обновляются после каждого такта, что увеличивает быстродействие в два раза.

3.2 Измерение малых сопротивлений

Для измерения малых сопротивлений к измерительному входу прибора подключают кабель с маркировкой «Ом». Измерения выполняются в непрерывном режиме. Опорное напряжение 2,45 В через эталонный резистор ЭР подаётся на измерительный вход прибора, подключенный ко входу АЦП МК. Результат измерения R_X вычисляется по формуле:

$$R_X = \frac{U_{\text{АЦП}} \times R_{\text{ЭТ}}}{U_{\text{ОП}} - U_{\text{АЦП}}} \quad (2)$$

Где: $U_{\text{АЦП}}$ – измеряемое напряжение на входе АЦП;
 $R_{\text{ЭТ}}$ – сопротивление эталонного резистора;
 $U_{\text{ОП}}$ – опорное напряжение.

3.3 Питание прибора

В приборе используются два Ni-Cd аккумулятора типа KCL-11 производства ОАО «НИИИ Источник», со следующими характеристиками:

- номинальная ёмкость – 11 А·ч;
- номинальное напряжение – 1,2 В;
- масса – 0,36 кг;
- габариты – 33x49x110 мм;
- диапазон рабочих температур – минус 20 ÷ плюс 50 °С;
- срок службы – 5 лет / 1500 циклов заряд – разряд.

Эти аккумуляторы достаточно надёжны, доступны и широко используются в горнодобывающей промышленности в осветительных приборах. К недостаткам следует отнести большие габариты и массу, большое время заряда, а также необходимость строго соблюдать правила эксплуатации для достижения заявленного срока службы [6].

Аккумуляторы следует хранить в разряженном состоянии. Для приведения их в рабочее состояние требуется выполнить несколько тренировочных циклов заряд – разряд до достижения номинальной ёмкости. Следует избегать разряда до напряжения ниже 1 В, грозящего выходом аккумулятора из строя. Первый заряд аккумуляторов, хранившихся более 6 месяцев, следует выполнять током 0,5 А длительностью 24 ч, а более свежих новых аккумуляторов – током 1 А/9 ч. Последующие заряды в тренировочных циклах выполнять ступенчатым током 2 А / 4 ч, 0,6 А/6 ч, 0,3 А / 6 ч. Ток разряда в тренировочных циклах – 2 А. Допускается выполнять заряд «падающим током», то есть током, сила которого снижается по мере достижения напряжением на клеммах аккумулятора своего конечного значения. Для исключения снижения ёмкости из-за влияния «эффекта памяти» перед зарядом необходимо аккумуляторы разрядить до напряжения 1 В.

Понятно, что простое зарядное устройство не может отвечать всем этим требованиям, поэтому процессом заряда управляет МК. При подключении сетевого кабеля к сети ~220 В зарядное устройство

ЗУ выдаёт команду «Сеть 220 В», по которой включается ПН и запускается МК в режиме управления зарядом. Оператору предлагается выбрать режим работы ЗУ:

- заряд падающим током;
- заряд новых аккумуляторов (с предварительным разрядом);
- разряд.

Если за 20 с режим не выбран, то начинается заряд падающим током, при этом МК задаёт и измеряет ток, отображает на ПИ силу тока заряда (разряда), а также принятую (отданную) ёмкость. При работе прибора осуществляется постоянный контроль напряжения на каждом аккумуляторе. Для этого они подключены ко входам АЦП МК через коммутатор К, управляемый напряжением с выхода ПН. Таймер МК задаёт максимальное время заряда 16 ч.

Если во время работы прибора напряжение на любом из аккумуляторов снизится до 1 В – МК выдаёт команду на выключение питания.

4 Технические характеристики

4.1 Диапазоны измерений:

- в сетях под рабочим напряжением – от 1 кОм до 5 МОм;
- в обесточенных сетях – от 1 кОм до 10 МОм;
- малых сопротивлений (режим пробника) – от 1 Ом до 10 кОм.

4.2 Пределы допускаемой основной относительной погрешности:

- при измерении сопротивления изоляции:

$$\delta = \pm \left(5 + \frac{100 \times 1 \text{ е.м.р.}}{R_X} \right) \%, \quad (4)$$

где 1 е.м.р. – единица младшего разряда, равная 1 кОм;

R_X – показание прибора, кОм.

- при измерении малых сопротивлений:

$$\delta = \pm \left(2 + \frac{100 \times 1 \text{ е.м.р.}}{R_X} \right) \%, \quad (5)$$

где 1 е.м.р. – единица младшего разряда, равная 1 Ом;

R_X – показание прибора, Ом.

4.3 Длительность цикла измерения при ёмкости сети 33 мкФ – не более 1 мин.

4.4 Измерительное напряжение, прикладываемое к контролируемой сети – не более ± 100 В.

4.5 Суммарное время работы прибора при полностью заряженных аккумуляторах – не менее 36 часов.

4.6 Время заряда аккумуляторов – не более 16 часов.

4.7 Масса прибора – не более 2,9 кг.

4.8 Срок службы прибора – 15 лет.

4.9 Внешний вид и габаритные размеры прибора приведены на рисунке 2.

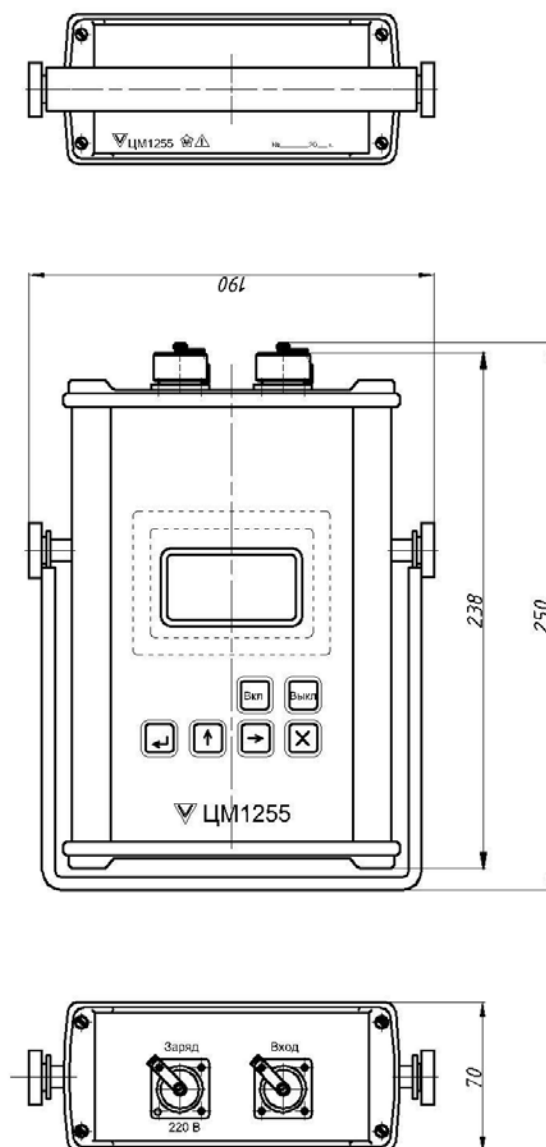


Рисунок 2 – Внешний вид и габаритные размеры ЦМ1255

Литература

1. ЗПА.450.059 РЭ М1428, М1628. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. –Режим доступа: http://vbrspb.ru>files/20060714-123225_1057478243.pdf
2. ЗПА.450.057 РЭ М1423, М1623. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 20160412-122421_585918255.pdf
3. ЗПА.399.138 РЭ ЦМ1628. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 20160412-161933_471982072.pdf
4. ЗПА.399.162 РЭ ИСИМ1623. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: 20160119_151139_1194009126.pdf
5. **Нгуен, Куонг Уи.** Быстродействующие устройства контроля и измерения сопротивления изоляции для систем управления электроэнергетическими объектами. Диссертация на соискание учёной степени кандидат технических наук / Нгуен Куонг Уи ЮРГПУ (НПИ) им.М. И. Платова. Новочеркасск, 2015.-230 с.
6. ИКШЖ.563512.021РЭ. Батареи из аккумуляторов KCL11. Руководство по эксплуатации. ОАО «НИАИ Источник». Санкт – Петербург, 2000. – 23 с.

ПРИБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ПЕРЕНОСНОЙ ЦК 1254

И. А. Глазунов, В. В. Островерхов, И. В. Корольков

АО «Приборостроительный завод ВИБРАТОР», г. Санкт-Петербург, РФ,
e-mail: osp@vibrator.spb.ru, тел. +7 (812) 598-92-00

Аннотация

Ключевые слова: комбинированный измерительный прибор электрика

Описана конструкция комбинированного измерительного прибора для контроля параметров электроустановок потребителей. Широкий диапазон входных сигналов позволяет контролировать большинство параметров электроустановок, а также проверять вольтметры, амперметры и частотомеры, установленные на щитах, в том числе, и судовых электроустановок. Наличие автономного питания прибора обеспечивает необходимую мобильность как в стационарных, так и при работе в полевых условиях. Отсутствие механических переключателей и наличие автоматического переключения диапазонов при измерении напряжения и частоты, должно обеспечить длительный срок службы прибора. Наличие встроенного контроля спектра измеряемого сигнала может позволить производить оценку степени износа контролируемого оборудования. Возможность накопления и последующего анализа данных на персональном компьютере может позволить производить статистический анализ работы оборудования и питающей сети.

Для контроля параметров электроустановок требуется компактный, мобильный, комбинированный измерительный прибор с широким диапазоном измеряемых параметров, обладающий дополнительными возможностями по обработке измерительной информации, например: измерение коэффициента искажения синусоидальности входного сигнала, проведение спектрального анализа и подключение персонального компьютера для накопления и анализа измерительной информации. Такой прибор должен работать как на постоянном так и на переменном токе частотой 50 или 400 Гц. Исходя из анализа требуемых параметров, была выбрана схема, построенная на микроконтроллере широкого применения ATxMega фирмы ATMEL. Наличие встроенного скоростного 12-разрядного АЦП позволяет реализовать все функции прибора на одном микроконтроллере, без применения специализированных микросхем. Проведенные испытания прибора показали, что все режимы прибора реализованы и достигнута требуемая точность измерений.

Измерительный комбинированный переносной прибор ЦК 1254 предназначен для измерения напряжений постоянного и переменного тока частотой 50/400 Гц на диапазонах 75 мВ – 750 В, по току 5, 10, 50 А постоянного и переменного тока частотой 50/400 Гц с помощью шунтов, входящих в комплект прибора, и на диапазонах 30 и 200 А с помощью токовых клещей. При измерении постоянного или переменного напряжения переключение диапазона измерения происходит автоматически и на всех режимах измерений автоматически определяется вид входного сигнала постоянный / переменный. При работе с переменным сигналом измеряется его частота и есть возможность увидеть форму сигнала, получить спектральные характеристики и коэффициент нелинейных искажений. Имеется возможность подключить прибор к персональному компьютеру (ПК) для накопления и дополнительной обработки данных. Также ПК используется в процессе настройки прибора.

Входной сигнал подается на делитель со встроенным диодным ограничителем. Входной делитель построен на базе усилителя с переменным коэффициентом усиления меньше 1 и управляется сигналами МК. Далее сигнал усиливается до уровня $\pm 0,5$ В и смещается на 0,5 В, что соответствует диапазону работы встроенного в МК аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Сигнал проходит фильтр, ограничивающий полосу пропускания тракта обработки входного сигнала (16 кГц). Параллельно с этим, фильтром с полосой 500 Гц отфильтровывается сигнал для измерения периода входного сигнала. Этот фильтр имеет дополнительный коммутатор для сужения полосы пропускания при измерении сигналов 50 Гц.

Измерение входного сигнала прибором начинается сразу после включения. При этом, если измеряемым сигналом является напряжение постоянного или переменного тока, то автоматически выбирается предел измерения и тип измеряемого напряжения (постоянного или переменного тока) и номинальная частота измеряемого переменного сигнала (50 Гц или 400 Гц).

Если измеряемым сигналом является постоянный или переменный ток (измеряемый с помощью токовых кабелей или измерительных клещей), то предел измерения задается выбором типа подключенного кабеля и переключателем на токовых клещах, а тип измеряемого тока и частота определяются автоматически.

На установленном пределе измерения напряжение $U_{Вх}$, эквивалентное входному измеряемому значению, подвергается дискретизации во времени и аналого-цифровому преобразованию по величине с помощью АЦП в МК. Предварительно определяется вид измеряемого напряжения (постоянное или переменное). Если напряжение переменное, то период разбивается на 128 равных частей и с данным интервалом производится аналого-цифровое преобразование двух периодов измеряемого сигнала. Если

сигнал постоянный, то аналого-цифровое преобразование производится с фиксированным интервалом и тоже получается массив из 256 значений.

Вычисление среднеквадратического значения $U_{\text{скр}}$ массива кодов АЦП измеряемого переменного напряжения производится по формуле:

$$U_{\text{скр}} = \sqrt{\frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} U_{\text{эки}}^2},$$

где $U_{\text{эки}}$ – значение i -й выборки измеряемого сигнала.

Вычисление среднего значения массива кодов АЦП $U_{\text{ср}}$ измеряемого постоянного напряжения проводится по формуле:

$$U_{\text{ср}} = \pm \left(\frac{1}{256} \sum_{i=1}^{256} U_{\text{эки}} \right)$$

Полученные безразмерные величины соответствуют коду АЦП, и реальные значения R (ток или напряжение) вычисляются по следующей формуле:

$$R = K_x \cdot U_{\text{скр}} + S_m - \text{для переменного тока или } R = K_x \cdot U_{\text{ср}} + S_m - \text{для постоянного тока,}$$

где K_x и S_m – индивидуальная пара коэффициентов для каждого вида измерений (постоянный ток или постоянное напряжение, переменный ток или переменное напряжение), так и для каждого диапазона. Также, вне зависимости от режима работы, для переменного сигнала по 128 точкам кодовых чисел АЦП производится быстрое преобразование Фурье (БПФ). В результате БПФ получается разложение входного сигнала на амплитуды гармоник A_n основной частоты до 40-й включительно.

Вычисление коэффициента искажения синусоидальности входного сигнала производится по формуле:

$$K_{\text{И}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} A_n \cdot A_n}}{A_1} \cdot 100\%.$$

Вычисление коэффициента n -ой гармонической составляющей входного сигнала производится по формуле:

$$K_{\Gamma}(n) = \frac{A_n}{A_1} \cdot 100\%.$$

Вычисленные таким образом коэффициенты искажения синусоидальности и коэффициенты гармонических составляющих входного сигнала выводятся в цифровом виде на дисплей БИ.

В основном режиме индикации на дисплей выводятся значения тока или напряжения с указанием полярности для постоянного тока или частоты для переменного тока. Имеется возможность вывести на дисплей дополнительную информацию по переменному току. При этом на дисплее БИ последовательно отображается следующая информация:

- форма измеряемого сигнала за один период частоты с коэффициентом искажения синусоидальности;
- гистограмма эффективных значений гармоник измеряемого сигнала относительно основной (первой) гармоники;
- цифровые значения коэффициентов гармонических составляющих в виде таблиц с 1 по 16, с 17 по 32 и с 33 по 40 гармонике измеряемого сигнала.

Прибор питается от аккумуляторной батареи типа КСЛ-11. На дисплее прибора имеется индикатор степени разряженности батареи, и при падении напряжения батареи ниже установленной величины, выводится предупреждающее сообщение с последующим выключением прибора. Непрерывное время работы не менее 36 часов в нормальных условиях. В приборе имеется встроенное зарядное устройство ЗУ, которое обеспечивает заряд аккумуляторной батареи «падающим током» при любом уровне ее разряженности, путем автоматической поддержки на выводах батареи постоянного напряжения 2,88 В. Предел допускаемой основной, приведенной к пределу измерений, погрешности измерений напряжений постоянного тока не превышает $\pm 0,5\%$ и предел допускаемой основной, приведенной к пределу измерений, погрешности измерений эффективных значений напряжения переменного тока не превышает $\pm 1\%$.

Выводы

В настоящий момент на комбинированный измерительный прибор ЦК 1254 получено свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.34.541.B за номером № 62975 и он может быть использован в сфере, относящейся к государственному регулированию обеспечения единства измерений.

ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЕФОРМАЦИЙ И ТЕМПЕРАТУР МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ПРИБОРОВ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ

Л. С. Заславский¹, А. И. Лептух, А. А. Фридлянд, В. Г. Суринт,
ОАО «НИИ Электромера», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: 39@electromera.ru

В. Ю. Рыжик, А. А. Слабнов

ООО «НПП «ПАРК-ЦЕНТР», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: info@parc-centre.spb.ru

Аннотация

Ключевые слова: измеритель, температур, деформаций

Приведены краткие технические характеристики измерителя деформаций и температур многоканального, разработанного ОАО «НИИ Электромера» и ООО «НПП «ПАРК-ЦЕНТР» для комплекса приборов судовой автоматики.

Измеритель деформаций и температур многоканальный (ИДТМ) предназначен для определения напряженно-деформированного состояния и температурных полей агрегатов газо- и нефтетранспортных систем в их критических точках, в которых размещаются тензорезисторные датчики деформаций и температурные датчики.



Рисунок - Внешний вид ИДТМ

ИДТМ обеспечивает следующие функциональные возможности:

- сбор, обработку и хранение информации при проведении непрерывного мониторинга напряженно-деформированного состояния и температурных полей критических зон агрегатов и узлов газо- и нефтетранспортных систем в технологическом процессе погрузочно-разгрузочных работ углеводородов на морских стационарных и плавучих объектах;
- наличие до 60 измерительных каналов с искробезопасными входными цепями [Exia]IIС;
- измерение сигналов от тензорезисторов с номинальными значениями 100, 120, 200, 350 Ом по схемам включения «полный мост», «полумост», «полумост с общим компенсационным тензорезистором на группу рабочих тензорезисторов (1/2М с ОКТ)»;
- измерение сигналов от термопреобразователей сопротивления с градуировочными характеристиками 50П, 100П, 500П, 50М, 100М по ГОСТ 6651;
- измерение сигналов от термоэлектрических преобразователей с градуировочными характеристиками ТХК, ТХА, ТПР по ГОСТ Р 8.585;
- программное конфигурирование каждого измерительного канала под конкретный тип

¹ Кандидат технических наук, начальник отдела.

подключаемого датчика.

- Основная приведенная погрешность измерительных каналов, не более - 0,1 %.
- В состав ИДТМ входят следующие составные части:
- устройство измерительное ИДТМ УИ – 1 или 2 шт.;
- устройство обработки информации ИДТМ УОИ – 1 шт.
- ИДТМ-УОИ выполнено на основе встроеного промышленного компьютера и сенсорного дисплея с диагональю 12 дюймов и обеспечивает выполнение следующих функций:
 - электропитание ИДТМ-УИ;
 - занесение в ИДТМ-УИ исходных данных - информации о порядке опроса измерительных каналов, типах подключенных к ИДТМ-УОИ датчиков, требуемой обработке результатов измерений, порядку вывода измеряемых параметров;
 - запуск ИДТМ-УИ на измерения, периодический опрос ИДТМ-УИ и прием от него значений измеряемых параметров;
 - отображение на экране результатов измерений в цифровой форме, сравнение результатов измерений с уставками;
 - регистрацию и хранение данных.
- ИДТМ-УИ обеспечивает выполнение следующих функций:
- подключение кабелей от датчиков объекта контроля;
- электропитание резистивных датчиков;
- опрос до 30 измерительных каналов и измерение электрических сигналов подключенных к ним датчиков;
- преобразование значений измеренной электрической величины в значения физической величины, измеряемой датчиком, с использованием соответствующих градуировочных характеристик;
- передачу измеренных значений физических величин в ИДТМ-УОИ по интерфейсу RS422A.

Для связи с системами верхнего уровня в ИДТМ предусмотрены интерфейсы Ethernet, RS232C, RS485.

Длина линий связи ИДТМ с датчиками до 100 м.

Конструкция ИДТМ – настенного исполнения.

Степень защиты ИДТМ от влаги и пыли по ГОСТ 14254 - IP54.

Габаритные размеры составных частей ИДТМ (ширина x высота x глубина), не более:

- ИДТМ-УИ 400 x 500 x 210 мм;
- ИДТМ-УОИ 500 x 500 x 210 мм.
- Масса, не более:
- ИДТМ-УИ 15 кг;
- ИДТМ-УОИ 18 кг.

Электропитание ИДТМ осуществляется от сети переменного тока напряжением (230 ± 23) В, частотой (50 ± 1) Гц. Мощность, потребляемая от сети переменного тока, не более 80 ВА.

Рабочие условия эксплуатации ИДТМ:

- диапазон температуры окружающего воздуха от 0 до 45 °С.

РЕГИСТРАТОР-КОНТРОЛЛЕР ВИДЕОГРАФИЧЕСКИЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСА ПРИБОРОВ СУДОВОЙ АВТОМАТИКИ

Л. С. Заславский¹, А. И. Лептух, В. Г. Суринт,
ОАО «НИИ Электромера», С.-Петербург, РФ, e-mail: 39@electromera.ru

В. Ю. Рыжик, А. А. Слабнов, А. В. Саввин
ООО «НПП «ПАРК-ЦЕНТР», С.-Петербург, РФ, e-mail: info@parc-centre.spb.ru

Аннотация

Ключевые слова: регистратор, контроллер, видеографический

Приведены краткие технические характеристики регистратора-контроллера видеографического, разработанного ОАО «НИИ Электромера» и ООО «НПП «ПАРК-ЦЕНТР» для комплекса приборов судовой автоматики.

Регистратор-контроллер видеографический (РКВ) предназначен для регистрации, документирования и отображения сигналов от аналоговых и дискретных датчиков, сигнализаторов, блокировочных контактов, сигналов ручного ввода, используемых в технологическом процессе отгрузки углеводородного сырья на морских судах.

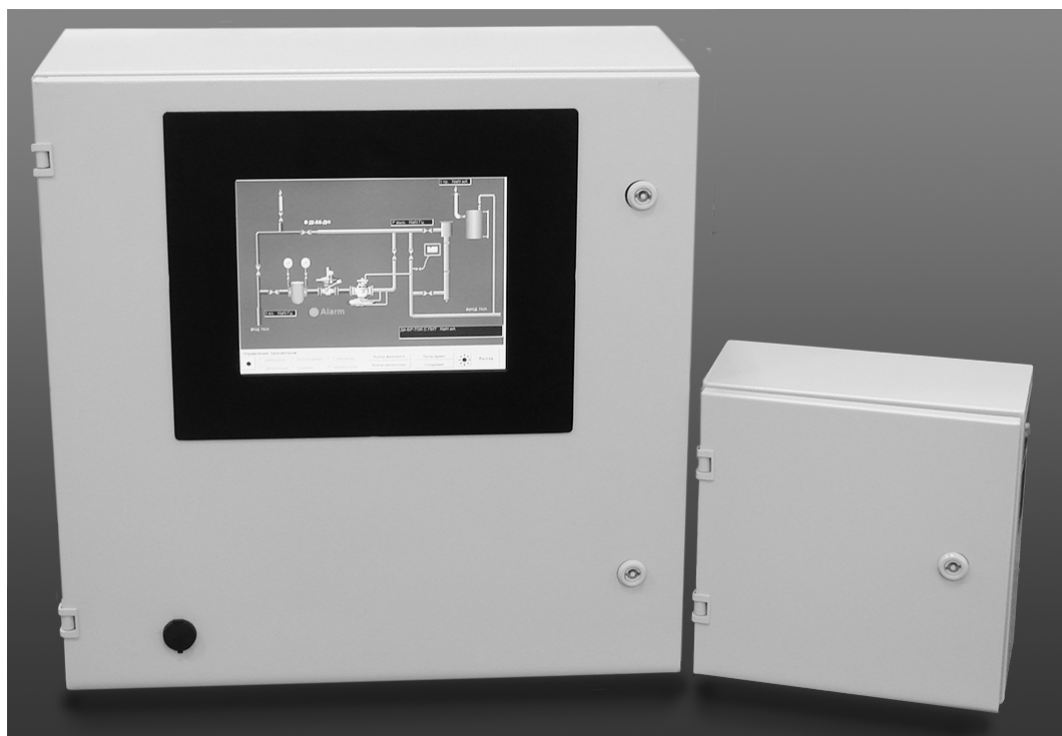


Рисунок - Внешний вид РКВ

РКВ обеспечивает следующие функциональные возможности:

- прием информации от различных типов аналоговых и дискретных датчиков;
- отображение информации на дисплее в виде трендов, лент, шкал, цифровых таблиц, таблиц состояния;
- регистрация и хранение данных;
- построение схемы технологического процесса отгрузки углеводородного сырья с отображением всех параметров;
- ведение журнала событий.

РКВ имеет цепи аналоговых входов, к которым возможно подключение датчиков с выходным сигналом в виде силы постоянного тока в диапазонах от 0 до 5 мА, от 0 до 20 мА, от 4 до 20 мА.

Допускаемая основная погрешность измерений сигналов аналоговых входов не более $\pm 0,1\%$ от верхнего предела диапазона измерений.

¹ Кандидат технических наук, начальник отдела.

РКВ имеет цепи частотно-импульсных входов, к которым возможно подключение датчиков следующих типов:

- датчики с выходным сигналом в виде частоты в диапазонах от 20 Гц до 20 кГц, от 2 Гц до 20 кГц, от 0,2 Гц до 20 кГц (относительная погрешность измерений частоты не более $\pm 0,01\%$);
- датчики с выходным параметром в виде временного интервала между импульсами (абсолютная погрешность измерений временного интервала не более 0,005 с);
- датчики счетного типа.
- РКВ имеет цепи дискретных входов, к которым возможно подключение сигнализаторов и дискретных датчиков.

Типы электрических сигналов, подаваемых на цепи частотно-импульсных и дискретных входов:

- «потенциальный вход»;
- «сухой контакт»;
- «Nanug» согласно IEC 60947-5-6-2000.

РКВ имеет дискретные выходы, предназначенные для управления внешним оборудованием и сигнализации, как в ручном режиме (по команде оператора), так и в автоматическом режиме (по срабатыванию уставок).

Каждый из дискретных выходов представляет собой промежуточное реле одного из трех типов:

- электромеханическое реле (один переключающий контакт, переменное напряжение 250 В / 6 А);
- симисторное реле (один замыкающий контакт, переменное напряжение 240 В / 2 А, переключение при переходе коммутируемого тока через ноль);
- твердотельное реле (один замыкающий контакт, постоянное напряжение 24 В / 2 А).

РКВ построен по блочному принципу, состоит из одного блока базового (РКВ ББ) и до четырех блоков расширения (РКВ БР). Максимальное количество используемых каналов ввода и вывода для различных составных частей РКВ:

- 36 аналоговых входов в РКВ ББ и 10 в каждом РКВ БР;
- 72 частотно-импульсных или дискретных входов в РКВ ББ и 20 в каждом РКВ БР;
- 36 дискретных выходов в РКВ ББ и 10 в каждом РКВ БР.

Для реализации задачи регистрации и хранения данных РКВ содержит в своем составе промышленную ЭВМ, функционирующую под управлением операционной системы Windows 7. Для связи с системами верхнего уровня и цифровыми датчиками в РКВ предусмотрены внешние интерфейсы RS485, RS422A, RS232C, CAN, Ethernet, USB. Для отображения и оперативного ввода информации РКВ содержит в составе РКВ ББ сенсорный монитор, построенный на основе промышленного цветного жидкокристаллического дисплея диагональю 12 дюймов и проекционно-емкостного сенсорного экрана.

Конструкция РКВ состоит из шкафов настенного исполнения, обеспечивающих степень защиты от пыли и влаги не менее IP54 по ГОСТ 14254. Подключение внешних кабелей осуществляется через кабельные вводы, расположенные на фланш-панели в нижней части каждого шкафа.

Габаритные размеры составных частей РКВ (ширина \times высота \times глубина), не более:

- РКВ-ББ 600 \times 600 \times 250 мм;
- РКВ-БР 300 \times 300 \times 155 мм.
- Масса, не более:
- РКВ-ББ 30 кг;
- РКВ-БР 10 кг.

Электропитание РКВ ББ осуществляется от сети переменного тока номинальным напряжением 230 В частотой 50 Гц. Электропитание РКВ БР осуществляется от сети постоянного тока номинальным напряжением 24 В, которое поступает или от РКВ ББ, или от дополнительных источников питания. Нагрузочная способность РКВ ББ позволяет обеспечивать электропитанием до двух РКВ БР.

РКВ относится к связанному оборудованию по ГОСТ Р МЭК 60079-11-2010, имеет взрывобезопасное исполнение с видом взрывозащиты «искробезопасная электрическая цепь», маркировку взрывозащиты [Exia]IIC и предназначен для установки вне взрывоопасных зон помещений и наружных установок.

Рабочие условия эксплуатации РКВ:

- диапазон температуры окружающего воздуха от 0 до 45 °С.

СИНХРОНОСКОП Э1550

С. А. Шабанов¹

Организация АО «Приборостроительный завод ВИБРАТОР», С.-Петербург, РФ,
e-mail: osp@vibrator.spb.ru, тел. +7 (812) 598-92-00

Аннотация

Ключевые слова: синхроскоп, генератор, синхронизация работы.

Синхроскоп Э1550 предназначен для синхронизации 3-фазных генераторов. Погрешность – не более 3°. Светодиодный индикатор, дискретность индикации 10°. IP 43/20. Виды приемки: ОТК, УО «Росэнергоатом», ВП, МР, РР. Класс безопасности по ОПБ88/97: 4, 3.

Синхроскоп обеспечивает:

- измерение и сравнение частот и напряжений работающего генератора и синхронизируемого генератора;
- сравнение углов фаз измеряемых напряжений и формирование сигнала управления на подключение генератора к шине с заданным временем опережения (для учета быстродействия внешних выключателей);
- блокировку сигнала управления при выходе измеряемых величин за граничные значения ранее установленных параметров;
- установку требуемых параметров по разности напряжений, частот генератора и сети, по времени опережения включения сигнала управления, по напряжению помех на обесточенной шине сети;
- выработку дискретного сигнала на синхронизацию 3-фазного генератора переменного тока с сетью;
- индикацию сигналов управления для подгонки напряжения и частоты генератора к напряжению и частоте на шине при выходе этих параметров за границы установленных значений;
- функцию защиты от двигательного режима.

Технические характеристики прибора:

- погрешность не более 3-х градусов;
- светодиодный индикатор, 36 светодиодов; дискретность индикации - 10°;
- 4 уставки:
- по разности напряжений генератора и шины – допустимая зона рассогласования напряжений генератора и сети от ± 2 до ± 10 % от U_n , дискретность 1 %;
- по разности частот генератора и шины – максимальная разность частот генератора и сети от 0,1 до 0,5 Гц, дискретность 0,1 Гц;
- по времени опережения – время опережения включения от 0 до 600 мс, дискретность 50 мс;
- по величине помехи на обесточенной шине – напряжение помехи на обесточенной шине сети от 10 до 40 % от U_n , дискретность 10 %;
- встроенное электромагнитное реле – максимальное коммутирующее напряжение 50 В для постоянного тока и 220 В для переменного тока; ток замыкания контактов при практически активной нагрузке – до 1 А.

Напряжение питания:

- 127 В переменного тока;
- 220 В переменного тока;
- 100 В переменного тока;
- 380 В переменного тока.

Потребляемая мощность:

- от генератора – 6,5 В·А;
- от сети, к которой подключается генератор – 0,5 ВА.

Необходимые условия для синхронизации:

- напряжения генератора и сети должны находиться в пределах от $0,75 U_{ном}$ до $1,2 U_{ном}$ и их разность не должна превышать значений установленного параметра ΔU ;
- частоты генератора и сети должны находиться в пределах от 45 до 65 Гц и их разность не должна превышать значений установленного параметра ΔF ;
- частота генератора выше частоты сети;
- разность частот генератора и сети не менее 0,05 Гц.

¹ Ведущий инженер-схемотехник.

Условия эксплуатации:

- диапазон рабочих температур: от - 20 °С до + 55 °С;
- относительная влажность: до 100 % при + 50 °С;
- сейсмостойкость 8 баллов;
- степень защиты корпуса – IP20 по корпусу; IP43 со стороны лицевой панели;
- масса – не более 0,8 кг;
- габаритные размеры: 96 x 96 x 109 мм;
- гарантийный срок 18 мес.; 24 мес. – для атомного исполнения, 60 мес. – для специального исполнения;
- межповерочный интервал – 6 лет.

Выводы

Приборы предназначены для включения судовых, корабельных и других синхронных машин на параллельную работу методом точной синхронизации.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ

МАГНИТО-ЭКРАНИРОВАННАЯ КОМНАТА КАК ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЕЕ СТРОИТЕЛЬСТВА

В. В. Привалов, И. С. Хасиев¹, В. И. Шеремет²

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», С-Петербург, РФ, e-mail: ¹i.S.Khasiev@vniim.ru,
²V.I.Sheremet@vniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: магнитное экранирование, магнитная индукция, пермаллой

Представлена магнито-экранированная комната (МЭК), разработанная и изготовленная во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, предназначенная для тестирования и юстировки прецизионных магниточувствительных преобразователей в промышленной зоне, насыщенной широким спектром магнитных помех.

Поясняется конструкция, состав и возможности МЭК. Приведены основные технические характеристики, соответствующие лучшим зарубежным образцам.

Приведены результаты исследований магнитных свойств большой партии пермаллоя, определено количественное распределение образцов по магнитной проницаемости. Исследовано влияние механических и термических воздействий на магнитные свойства пермаллоев на примере двух сплавов, показана возможность использования пайки в строительстве МЭК, определены количественные характеристики изменения магнитной проницаемости от различных видов механической обработки.

Для юстировки прецизионных магниточувствительных преобразователей в промышленной зоне, насыщенной магнитными помехами различной интенсивности, направленности и частоты, компенсаторы и стабилизаторы магнитной индукции могут быть неэффективными. В этих условиях обычно применяются магнитные экраны и чаще всего - ферромагнитные. Методы и технологии их изготовления давно известны и апробированы [1]. В современных условиях возникает необходимость тестирования магниточувствительных преобразователей (МЧП) непосредственно в составе носителя с целью учета намагниченности самого носителя и снятия или компенсации вызванной им девиации. Учитывая возможные значительные размеры таких носителей и необходимость исключения при настройках МЧП внешних магнитных помех, требуется создание магнито-экранированных комнат (МЭК) с полезным внутренним объемом 15-20 м³. Такой опыт также известен и у нас и зарубежом [2].

Известно, что после термической обработки (отжига) по ГОСТ 10160-75 пермаллой запрещено подвергать какой-либо механической либо термической обработке под угрозой утраты им магнитных свойств. Однако, при строительстве таких крупных сооружений, как МЭК, трудно избежать механических воздействий на листы, из которых собираются элементы комнаты. Поэтому, нами были проведены исследования по проверке влияния различных механических и термических воздействий на пермаллоевые сплавы типа 79НМ и 50Н. В таблице 1 приведены результаты изменения максимальной и начальной магнитной проницаемости стандартных образцов двух сплавов при различных механических и термических воздействиях. Методика измерений магнитной проницаемости соответствовала ГОСТ 8.377-80.

Таблица 1

№ п/п	Вид воздействия	Сплав	До		После	
			μ нач	μ max	μ нач	μ max
1	Падение с 1 м	79НМ	85800	395000	66300	286200
2	Шлифовка шкуркой	79НМ	62000	376400	54600	168600
3	Удар (рихтовка)	79НМ	79000	318700	45900	173200
4	Сгиб - разгиб	79НМ	42100	160400	4960	15420
5	Вторичное падение с 1 м	79НМ	85800	395000	15600	96000
6	Вторичная рихтовка (удар)	79НМ	79000	318700	8300	65100
7	Вторичная шлифовка шкуркой	79НМ	62000	376400	41600	104300
8	Нагревание до 200 °С и охлаждение	50Н	8200	68400	7600	62000

№ п/п	Вид воздействия	Сплав	До		После	
			$\mu_{нач}$	μ_{max}	$\mu_{нач}$	μ_{max}
9	Лужение ПОС-61	50Н	8200	68400	7950	64300
10	Пайка ПОС-61	50Н	8200	68400	7700	62500
11	Пайка ПОС-61	79НМ	69100	329500	55200	254200
12	Склейка "Момент"	79НМ	72400	383600	62600	295400

Из приведенных данных следует, что при механических и термических воздействиях не происходит полной потери магнитных свойств сплавов пермаллоя. Например, при склейке и пайке магнитные свойства ухудшаются на $(10\div 25)\%$, при шлифовке - на $(35\div 70)\%$, а вот при сгибах уменьшаются более, чем в 10 раз. Одновременно можно констатировать, что сплав 50Н более устойчив к механическим воздействиям, чем сплав 79НМ. Кроме того, от большинства воздействий начальная магнитная проницаемость уменьшается менее резко, чем максимальная. Поскольку для многослойного магнитного экранирования важна именно начальная магнитная проницаемость, то полученные результаты внушают оптимизм и дают возможность построить МЭК в реальных условиях производства, но с соблюдением максимальной осторожности в работе с пермалловыми деталями.

Существует технологический разброс в режимах производства никелевых сплавов, который приводит к существенному разбросу магнитных свойств между приобретаемыми партиями материала. Учитывая количество необходимого пермаллоя для построения МЭК (около 9000 кг) и вес одной плавки (около 150 кг), разброс параметров может быть весьма значительным.

Для прогнозирования конечных магнитных свойств материала, используемого для изготовления МЭК, необходимо знать реальное распределение магнитной проницаемости в образцах закупленной партии пермаллоя. С этой целью были исследованы магнитные свойства около 60 образцов закупленного материала по методике ГОСТ 8.377-80.

В таблице 2 представлено распределение количества образцов пермаллоя 79НМ по максимальной магнитной проницаемости, а в таблице 3 аналогичное распределение образцов для сплава 50Н.

Таблица 2

μ_{max}	≤ 100000	≤ 150000	≤ 200000	≤ 300000	≤ 400000
Кол-во образцов 79НМ, %	8,9	35,6	27,6	24,4	4,4

Таблица 3

μ_{max}	≤ 70000	≤ 80000	≤ 900000	≤ 950000
Кол-во образцов 50Н, %	19	38,1	23,8	19

Проведенные измерения показали, что большая часть закупленного пермаллоя характеризуется магнитной проницаемостью $(100\div 150)\cdot 10^3$ Гс/Э для сплава 79НМ и $(70\div 80)\cdot 10^3$ Гс/Э для сплава 50Н.

Исходя из полученных результатов, было запланировано изготовление внешнего слоя МЭК из пермаллоя 50Н, следующий слой изготовлен из 79НМ с $\mu_{max}=(100\div 150)\cdot 10^3$ Гс/Э, соответственно, два внутренних слоя собраны из материала с большим μ , причем, внутренний (1-й слой) должен собираться из пермаллоя с максимальными значениями магнитной проницаемости.

Основной проблемой при строительстве МЭК является отжиг и соединение стен из листов выбранного размера.

Максимальный размер пермаллоя (сплав 79НМ), из которого в основном собирались стены МЭК, – это лента шириной 250 мм, лента большего размера пока не выпускается нашей промышленностью. Поскольку для термообработки деталей из пермаллоя необходима вакуумная печь на температуру 1100 °С с регулируемой скоростью нагрева и охлаждения (ГОСТ 10160–75), то найденная нами установка с внутренним объемом 0,6х0,6х0,9 м также ограничила максимальную длину деталей, из которых может собираться МЭК.

На рис. 1 приведено схематическое изображение МЭК.

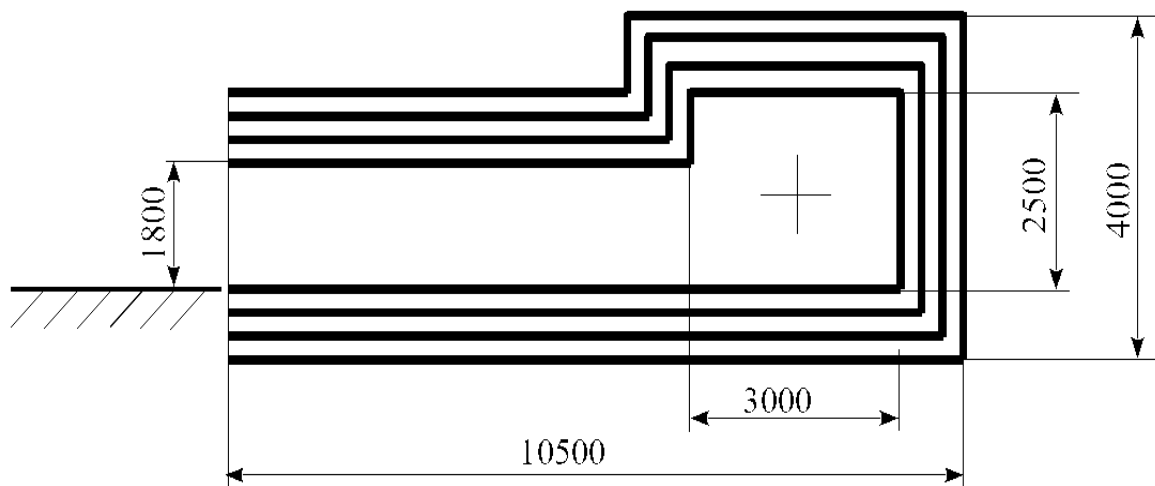


Рисунок 1 - Схематическое изображение МЭК

Поскольку необходимо было устанавливать МЭК в другом городе, конструкция была выбрана сборно-разборная, состоящая из однотипных стенок различного размера. Каждая стенка представляла собой законченную многослойную конструкцию, приспособленную к транспортировке и монтажу на месте установки МЭК. Стенки состоят из набора пермалловых листов 250x900 мм толщиной 1 мм, собранных в 2 слоя и зажатых через изоляционные прокладки между алюминированными оребренными панелями. На каждой стенке закреплена система шин и контактов, предназначенных для периодического размагничивания стенок в процессе эксплуатации.



Рисунок 2 - Фотография МЭК

Листы пермаллоя собираются в единое экранирующее поле (стенку) при помощи пайки, которая, как показано выше, менее всего влияет на магнитные свойства никелевых сплавов. Технология сборки предусматривала механическую обработку неотожженных листов пермаллоя (размеры, отверстия, маркировка), предварительную полную сборку стенки (подгонка), разборку, отжиг пермаллоя пачками по 30-40 шт. в вакуумной печи, повторную сборку с пайкой листов, шин и контактов, контроль параметров и упаковку в транспортную тару.

На рис. 2 приведена фотография МЭК.

Построенная МЭК имеет следующие технические характеристики:

- остаточная магнитная индукция внутри рабочего объема не превышает 5 нТл;
- размеры внутреннего полезного объема 2,4x2,4x2,9 м;
- внешние габаритные размеры не превышают 4,1x4,1x10,5 м;
- коэффициент экранирования синусоидального магнитного поля на частоте 50 Гц не менее 10000;
- размеры внутреннего рабочего объема 1x1x1 м.

Следует заметить, что полученные характеристики находятся на уровне лучших зарубежных образцов [2,3].

МЭК снабжена немагнитными системами вентиляции и освещения, которая обеспечивает не менее 150 лк освещенности в рабочем объеме внутри комнаты.

Кроме того, МЭК укомплектована:

- стационарным источником размагничивания слоев МЭК;
- переносным устройством размагничивания;
- безмоментной мерой магнитной индукции БММИ;
- трехкомпонентным магнитометром МТ-5;
- источником постоянной и переменной магнитной индукции ИП-1.

На сегодня, это единственная МЭК такого размера и класса в нашей стране.

Литература

1. **Схоменко, А. Н.** Рабочий эталон индукции постоянного поля для условий промышленной зоны /А. Н. Схоменко, В. И. Шеремет, И. С. Хасиев//Авиакосмическое приборостроение.-2002.-№6. -С. 60-63.
2. **Киршвинк Дж.** Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое в биомагнетизме. Том 1: Пер. с англ. /Под ред. Дж. Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена. -М.: Мир, 1989. -353 с.
3. **Bork J.** The 8-layered magnetically shielded room of the PTB: Design and construction/ J. Bork [and others]// Proceedings of 12-th International Conference on Biomagnetism, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2001, pp. 970-973.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ КОНТРОЛЯ И ИСПЫТАНИЙ ПРЕЦИЗИОННЫХ БОРТОВЫХ ГРАВИМЕТРОВ

А. А. Краснов¹, Т. Н. Сирая², А. В. Соколов³

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, РФ, e-mail: office@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: гравиметр, средство измерений, калибровочная характеристика, погрешность, методика измерений

В докладе изложены основные вопросы, которые возникают в ходе метрологического сопровождения разработки и испытаний мобильных гравиметров серии «Чекан», а также при проведении испытаний гравиметров с целью утверждения типа средств измерений. Описывается опыт метрологического сопровождения разработки гравиметров серии «Чекан» в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Сформулированы предложения по повышению эффективности обеспечения гравиметров как средств измерений, в том числе, в части нормативно-методического обеспечения.

Введение

Прецизионные бортовые (мобильные) гравиметры получают все более широкое распространение в различных областях приложений [1 - 9]. Они могут применяться как самостоятельно, для решения ряда геофизических задач [3, 8, 9], так и в составе наиболее точных навигационных комплексов.

В общем круге высокоточной навигационной аппаратуры гравиметры выделяются, в том числе, тем, что они относятся к средствам измерений (СИ) или (в зависимости от конкретной области их применения) к средствам измерений военного назначения (СИ ВН), с сохранением всех правил, установленных для СИ [10].

Ввиду возрастания требований к точности определения геофизических параметров, постоянно повышаются и требования к метрологическим характеристикам (МХ) гравиметров, и потому разработка методов определения, контроля и подтверждения указанных характеристик остается актуальным вопросом.

Поэтому для бортовых гравиметров – как в аспекте навигационной аппаратуры, так и в аспекте СИ – весьма важны процедуры контроля МХ, которые на требуемом (высоком) уровне точности сложны и трудоемки.

В то же время, гравиметры – это весьма специфические СИ, при метрологическом обеспечении (МО) которых возникают различные метрологические проблемы, требующие решения. К ним относятся, прежде всего, следующие:

1) Не стандартизованы методы эталонирования гравиметров и контроля их МХ, и потому необходимо разрабатывать нестандартизованные методики измерений, которые подлежат аттестации.

2) Недостаточно разработано и стандартизовано метрологическое сопровождение эксплуатации гравиметров.

3) Гравиметры до сих пор недостаточно обеспечены в нормативно-законодательном аспекте. В частности, отсутствует ГОСТ на морские бортовые гравиметры, аналогичный ГОСТ 13017-83 на наземные гравиметры [11]. Поэтому процедуры определения МХ регламентируются, главным образом, Инструкцией ИГ-78 [12], которая недостаточно отражает потребности мобильных гравиметров как СИ и требует актуализации.

В настоящее время вопросы разработки мобильных гравиметров достаточно полно отражены в ряде публикаций [1 - 6]; однако метрологические аспекты работ и вопросы обеспечения гравиметров как СИ освещены существенно меньше, следует отметить лишь статью [7].

В данном докладе кратко отмечаются основные метрологические проблемы, которые возникают как при проведении предварительных и государственных испытаний прецизионных бортовых гравиметров, так и при проведении их испытаний с целью утверждения типа СИ или СИ ВН.

Указанные вопросы рассматриваются, прежде всего, применительно к гравиметрам, разрабатываемым и выпускаемым в настоящее время АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

1 Общие сведения о бортовых гравиметрах

В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» давно разрабатывается и выпускается серия бортовых гравиметров высшей точности. В 2001 г. был разработан мобильный гравиметр «Чекан-АМ», который в настоящее время активно используется российскими и зарубежными геофизическими компаниями при выполнении морских и авиационных гравиметрических работ с целью поиска нефтегазоносных структур

¹ Начальник сектора.

² Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

³ Кандидат технических наук, заместитель генерального директора по инновациям.

[6, 9]. Гравиметры «Чекан-АМ» прошли испытания с целью утверждения типа СИ в Испытательном центре ГЦИ СИ ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Далее был разработан модернизированный гравиметрический комплекс, который имеет более высокие точностные характеристики, обладает расширенным динамическим диапазоном измерений и позволяет выполнять измерения силы тяжести в любой точке Земного шара. В 2014 г. такой гравиметрический комплекс прошел испытания с целью утверждения типа СИ ВН в Испытательном центре ГЦИ СИ ФБУ «ГНМЦ Минобороны России».

В настоящее время разработан новый мобильный гравиметр серии «Чекан»; при этом значительное внимание было уделено повышению инструментальной точности его гравиметрического датчика за счет разработки малогабаритного чувствительного элемента, а также модернизации опико-электронного преобразователя и проектирования новой системы термостатирования.

Во всех созданных в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» гравиметрических комплексах в качестве чувствительного элемента используются различные модификации двойной кварцевой упругой системы гравиметра (УСГ) крутильного типа, разработанной Институтом физики Земли РАН [5].

В качестве примера на рис. 1. приведена схема построения гравиметрического датчика (ГД) нового поколения.

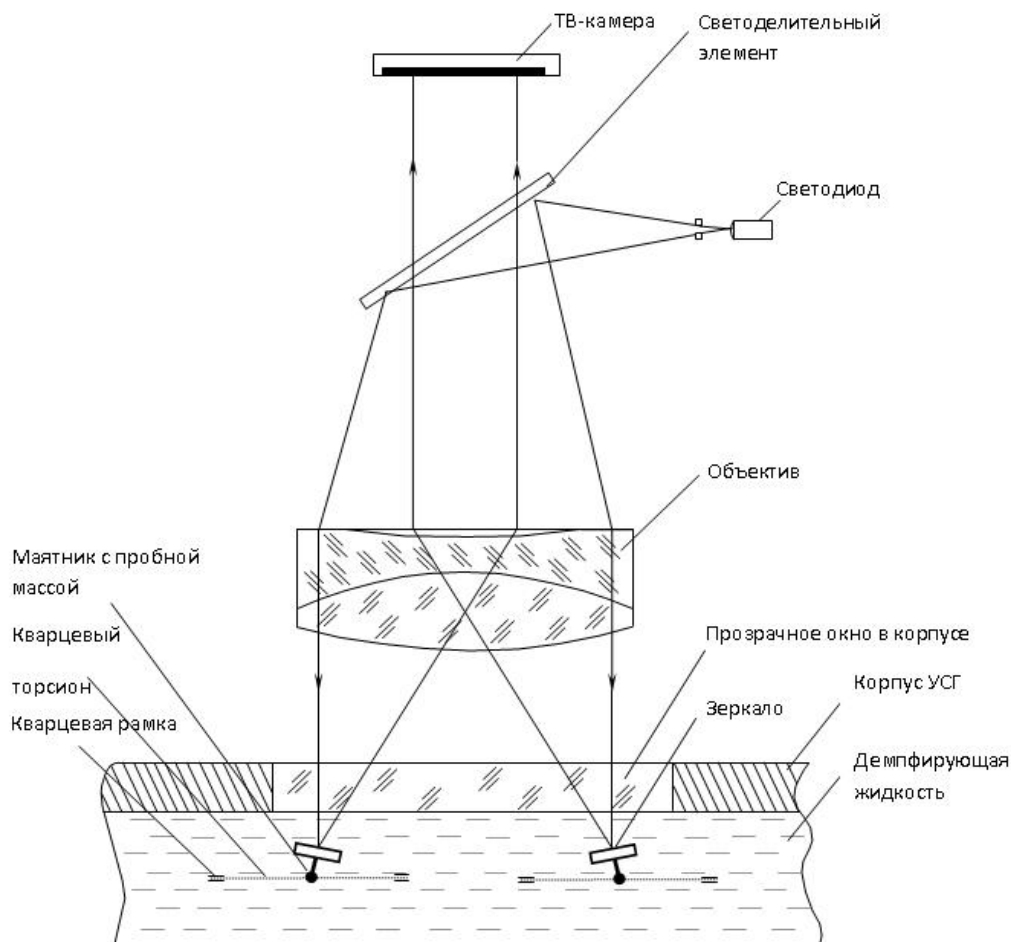


Рисунок 1 – Схема построения гравиметрического датчика

Основой гравиметрического датчика является двойная кварцевая упругая система крутильного типа, которая состоит из двух идентичных кварцевых систем, помещенных в корпус, заполненный демпфирующей жидкостью. Каждая система содержит кварцевую рамку с торсионом, к которому приварен маятник с пробной массой. Нить торсиона закручена так, чтобы исходное положение маятника было близко к горизонту. Для поддержания постоянной температуры кварцевая упругая система помещена в термостат. Для удержания чувствительного элемента гравиметрического датчика в плоскости горизонта датчик установлен на гиостабилизированной платформе.

Приращение ускорения силы тяжести преобразуется в угол поворота маятника, для измерения которого используются зеркала, плоскости которых параллельны осям маятника и развернуты на небольшой угол в ортогональном направлении.

Выходной величиной УСГ является угол φ поворота рычага маятника, который изменяется с приращением силы тяжести Δg в соответствии с выражением:

$$\Delta\varphi = K \cdot \Delta g,$$

где K - чувствительность упругой системы, которая в зависимости от жесткости торсиона может быть в пределах от 0,3 до 1,5 "/мГал.

Съем информации об угловом положении маятников УСГ выполняется при помощи оптико-электронного преобразователя (ОЭП), работающего в автоколлимационном режиме [7]. В ОЭП в качестве фотоприемника используется специализированная 5-мегапиксельная черно-белая КМОП-матрица.

Общий вид модернизированного гравиметра приведен на рисунке 2.



Рисунок 2 - Внешний вид модернизированного гравиметра

В результате проведенных испытаний для модернизированного гравиметра установлены метрологические и технические характеристики, приведенные в табл. 1

Таким образом, мобильные гравиметры серии «Чекан» являются прецизионной навигационной аппаратурой, которая позволяет решать задачи морской и авиационной гравиметрической съемки с наивысшей точностью.

Таблица 1 - Метрологические и технические характеристики гравиметра

Наименование параметра или характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерений приращения ускорения силы тяжести, Гал	± 5
Средняя квадратическая погрешность измерений ускорения силы тяжести, мГал, не более	0,5
Пределы приведенной погрешности градуировочной характеристики изделия, %	$\pm 0,05$
Среднее квадратическое отклонение основной случайной погрешности измерений ускорения силы тяжести, мГал, не более	0,1
Габаритные размеры (наружный диаметр \times высота), мм, не более	390 \times 550
Масса, кг, не более	51
Условия эксплуатации: - диапазон широт, - температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$ - относительная влажность воздуха при температуре 25 $^{\circ}\text{C}$, % - синусоидальная вибрация носителя изделия: диапазон частот, Гц амплитуда виброускорения, м/с^2 , не более - пределы вертикальных возмущающих ускорений, м/с^2 - амплитуда бортовой качки судна с периодом от 6 до 20 с, не более - амплитуда килевой качки судна с периодом от 6 до 20 с, не более - рыскание судна, не более - напряженность внешнего постоянного магнитного поля, А/м (Э), не более - внешнее переменное магнитное поле: диапазон частот, Гц напряженность, А/м (Э), не более	от 0 до 90 $^{\circ}$ от 5 до 35 до 80 от 5 до 35 2 ± 2 15 $^{\circ}$ 10 $^{\circ}$ 5 $^{\circ}$ 400 (5) от 5 до 400 80 (1)
Электропитание: - переменный ток: напряжение, В - частота, Гц - постоянный ток: напряжение, В	220 \pm 10 50 \pm 1 27 \pm 3
Мощность, потребляемая изделием, Вт, не более	700

Опыт эксплуатации гравиметрических комплексов серии «Чекан» показал [6, 7], что на итоговое качество выполненной гравиметрической съемки существенно влияет инструментальная точность гравиметрического датчика, которая в свою очередь зависит от ряда факторов, среди которых можно выделить: влияние изменения температуры окружающей среды, стабильность и величина дрейфа нуля, степень демпфирования чувствительного элемента, точность съема информации и т.д. Поэтому дальнейшее совершенствование мобильных гравиметров серии «Чекан» реализуется, прежде всего, в направлениях исследования влияния указанных факторов и снижения этих влияний как за счет совершенствования конструкции, так и применения методических средств (разработки методик, введения поправок).

2 Особенности метрологического обеспечения бортовых гравиметров

Основным противоречием, порождающим проблемы МО мобильных гравиметров, является то, что гравиметр создается и применяется как навигационное устройство, но дополнительно легализуется (аттестуется) как средство измерений и, соответственно, подлежит МО по правилам, регламентированным для СИ.

2.1 Проблема эталонирования

Важнейшим вопросом для гравиметров, как и для любых высокоточных СИ, является процедура передачи размера единицы, или эталонирование. Ввиду высокого (по существу, эталонного) уровня точности гравиметров, традиционный способ эталонирования – передача размера единицы ускорения от государственного вторичного эталона - не обеспечивает решения задачи.

Таким образом, в данном случае необходимо выполнять, так называемые, «сверхточные измерения» [13], которые в рамках существующей системы МО не удастся реализовать с требуемой точностью прямыми стандартизованными методами. Действительно, путем прямых сличений гравиметров с эталонами не удастся обеспечить и подтвердить требуемую точность гравиметров.

Воспроизведение единицы гравиметром как СИ, в строгом метрологическом смысле слова, выполняется при калибровке гравиметрического датчика (ГД) с использованием метода наклона [7, 11], по методике, реализующей косвенный метод воспроизведения единицы на основе точных воспроизведений углов наклона датчика.

Метод наклона стандартизован для калибровки наземных гравиметров [11], однако стандартизованные методики контроля для бортовых гравиметров до настоящего времени отсутствуют. Поэтому для эталонирования и контроля градуировочных характеристик бортовых гравиметров разработаны нестандартизованные методики измерений, которые прошли аттестацию по ГОСТ Р 8.563-2009.

Указанная методика эталонирования гравиметров основана на следующем. Гравиметрический датчик подвергается серии наклонов на фиксированные углы и производится запись его показаний в установившемся режиме. Измерения углов наклона выполняются с высокой точностью (пределы погрешностей $\pm 2''$), и по этим данным рассчитывается проекция ускорения силы тяжести на ось чувствительности ГД. Далее по методу наименьших квадратов определяются коэффициенты b и a квадратичной градуировочной характеристики гравиметра, представляющей собой зависимость показаний гравиметра Δg , мГал, от отсчетов m , пикс:

$$\Delta g = bm + am^2.$$

Например, при эталонировании модернизированного ГД [7] были определены коэффициенты преобразования каждой из кварцевых систем УСГ, которые составили:

$$b_1 = 6,346548 \text{ мГал/пикс},$$

$$b_2 = 6,402359 \text{ мГал/пикс}.$$

Эти коэффициенты рассчитаны при квадратичном коэффициенте:

$$a = 75,04 \text{ нГал/пикс}^2.$$

Таким образом, отклонения коэффициентов преобразования кварцевых систем оказались менее 0,5 %.

Одним из важных метрологических вопросов является обоснование адекватности полученной квадратичной градуировочной характеристики гравиметра. С этой целью исследованы остаточные погрешности, то есть отклонения данных от построенной градуировочной характеристики.

На рис. 3 приведены графики остаточной погрешности неадекватности в диапазоне измерений ± 4 Гал в двух сериях наклонов. Из графика видно, что значения погрешностей находятся в пределах $\pm 0,3$ мГал. Следует отметить, что пределы погрешностей неадекватности градуировочной характеристики для модернизированных ГД снижены примерно в 1,5 раза по сравнению с пределами для ГД гравиметра «Чекан-АМ» и, кроме того, характер изменения погрешностей имеет высокую воспроизводимость на всех углах наклона. Это существенное продвижение объясняется не только разработкой новой конструкции ГД, но и усовершенствованием методики эталонирования ГД, в том числе, применением высокоточного автоматизированного трехосного поворотного стенда Асutronic АС3367-ТСС.

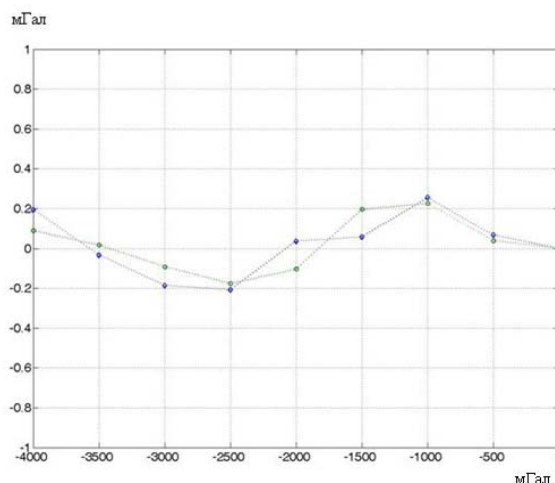


Рисунок 3 - График остаточной погрешности градуировочной характеристики в двух приемах эталонирования

2.2 Метрологическое обеспечение гравиметров на этапе эксплуатации

При создании гравиметра как навигационного средства предусмотрено проведение всех установленных процедур подтверждения соответствия, включая предварительные и государственные испытания, как на стенде, так и на полигоне. Кроме того, выполняется первичная поверка гравиметра как СИ.

Основные процедуры гравиметрической съемки и использования гравиметров на объекте регламентируются, главным образом, Инструкцией по морской гравиметрической съемке ИГ-78 [12]. Этот документ достаточно подробно отражает вопросы организации гравиметрической съемки с использованием гравиметров, а также испытаний гравиметров на объекте (на полигоне). В том числе, регламентируются:

- процедуры введения поправок на все влияющие факторы;
- оценивание погрешностей гравиметрической съемки по сети галсов.

Это обеспечивает качество использования гравиметров как навигационных средств. С другой стороны, для обеспечения качества гравиметров как СИ (в том числе, для обеспечения качества гравиметрической съемки в целом) необходимо выполнять контроль нормированных МХ гравиметров. Это выполняется в соответствии с разработанной методикой поверки. Таким образом, методика поверки гравиметров, которая разрабатывается при проведении испытаний гравиметров с целью утверждения типа СИ, является основным документом, определяющим метрологическое обеспечение гравиметров как СИ. В связи с этим, методика поверки гравиметров должна содержать методики контроля всех основных МХ, установленных для СИ (см. табл. 1).

Как и в случае эталонирования, ключевой методикой здесь является проверка пределов приведенной погрешности градуировочной характеристики ГД. При этом также используется метод наклона. Заданные в рабочем диапазоне углы наклона последовательно реализуются с высокой точностью, и полученные отсчеты гравиметра сравниваются с эталонными (расчетными) значениями. Описанная методика позволяет контролировать приведенную погрешность градуировочной характеристики ГД; это гарантирует то, что гравиметр сохраняет размер единицы (мГал) в период между поверками.

Для практического применения гравиметров как СИ актуален также вопрос об установлении межповерочного интервала. В принципе, такой интервал, рассчитанный в соответствии с РМГ 74-2004 [14] и установленный в Описании типа СИ, для гравиметров составляет 2 года.

Однако на практике нередко сроки поверки нарушаются, поскольку ввиду большой загрузки гравиметров и удаленности мест их применения бывает сложно снимать их и привозить в поверку. Вместе с тем, опыт эксплуатации гравиметров показывает, что межповерочный интервал, как правило, может быть увеличен без ущерба для достоверности измерений. Поэтому в ближайшее время было бы целесообразно на основе накопленного опыта применения гравиметров подготовить обоснование возможности увеличить сроки между поверками.

2.3 Нормативное обеспечение гравиметров

В настоящее время основные процедуры гравиметрической съемки и использования гравиметров на объекте регламентируются, главным образом, Инструкцией по морской гравиметрической съемке ИГ-78 [12]. Однако редакция ИГ 1978 г. недостаточно отражает вопросы обеспечения гравиметров как средств измерений. Поэтому было бы целесообразно разработать новую редакцию ИГ, в частности, учитывающую особенности разработки нового поколения гравиметров, результаты их исследований и проведения испытаний с целью утверждения типов СИ или СИ ВН.

Кроме того, в настоящее время отсутствует ГОСТ на морские бортовые гравиметры, аналогичный ГОСТ 13017 на наземные гравиметры [11]. В частности, отсутствие такого ГОСТ приводит к некоторым затруднениям при проведении испытаний гравиметров с целью утверждения типов СИ или СИ ВН.

Поэтому целесообразно разработать ГОСТ или отраслевой ОСТ на бортовые (мобильные) гравиметры, который содержал бы, в том числе, следующие разделы:

- Номенклатура МХ гравиметров;
- Методики поверки гравиметров;
- Типовые методики измерений с использованием гравиметров.

При решении вопросов о номенклатуре и нормировании МХ гравиметров, кроме традиционных правил нормирования МХ следует учитывать основной принцип [13], устанавливающий приоритет штатных процедур оценивания соответствия навигационного устройства относительно метрологических процедур. Применительно к выделению и нормированию МХ выявляется существенная особенность номенклатуры МХ «навигационных» СИ по сравнению с МХ традиционных СИ, а именно – снижение роли основных погрешностей СИ (определяемых в нормальных условиях) и повышение значимости дополнительных погрешностей, обусловленных различными влияющими величинами.

Для повышения эффективности использования гравиметров должны быть стандартизованы методики их поверки и основные методики измерений с использованием гравиметров. Такие

стандартизованные методики могут быть разработаны на основе опыта разработки и метрологического сопровождения гравиметров в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

4 Выводы

Современные бортовые гравиметры - высокоточные навигационные устройства, успешно используемые во многих научно-технических областях. С целью повышения эффективности их использования как измерительной аппаратуры представляется целесообразным следующее.

– Разработать ГОСТ (или отраслевой ОСТ) на бортовые гравиметры, регламентирующий вопросы метрологического обеспечения гравиметров.

– При разработке новой редакции Инструкции по гравиметрической съемке отразить метрологические аспекты применения гравиметров.

При создании указанных документов целесообразно учитывать опыт разработки и метрологического сопровождения высокоточных мобильных (бортовых) гравиметров в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00801).*

Литература

1. **Krasnov A. A., Nesenyuk L. P., Peshekhonov V. G., Sokolov A. V., Elinson L. S.** Marine Gravimeter of a New Generation. - Proceedings of International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – 2007. – P. 15-20.
2. **Krasnov A. A., Nesenyuk L. P., Peshekhonov V. G., Sokolov A. V., Elinson L. S.** Integrated Marine Gravimetric System. Development and Operation Results. Gyroscopy and Navigation. 2011. Т. 2. № 2. С. 75-81.
3. **Блажнов Б. А., Несенюк Л. П., Пешехонов В. Г., Соколов А. В., Элинсон Л. С., Железняк Л. К.** Интегрированный мобильный гравиметрический комплекс. Результаты разработки и испытаний // В сб.: «Применение гравинерциальных технологий в геофизике». Ред. В.Г.Пешехонов - С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2002.- С. 33–44.
4. **Краснов А. А., Соколов А. В., Элинсон Л. С.** Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» // Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 26-34.
5. **Железняк Л. К., Попов Е. И.** Новая упругая система морского гравиметра. Гравинерциальная аппаратура в геофизических исследованиях. М.: ИФЗ АН СССР.1988.
6. **Краснов А. А., Соколов А. В., Элинсон Л. С.** Результаты эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» - Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 98-104.
7. Евстифеев М. И., Краснов А. А., Соколов А. В., Старосельцева И. М., Элинсон Л. С., Железняк Л. К., Конешов В. Н Гравиметрический датчик нового поколения // Измерительная техника. - 2014. - № 9. – С.12-15.
8. **Краснов А. А., Соколов А. В.** Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра "Чекан-АМ". Труды Института прикладной астрономии РАН. 2009. № 20. С. 353-357.
9. **Железняк Л. К.** Точность измерений гравиметрическим комплексом «Чекан-АМ» в море. Физика Земли. 2010. № 11. С. 95-98.
10. ПМГ 121-2013 ГСИ. Порядок проведения испытаний средств измерений в целях утверждения типа
11. ГОСТ 13017-83 «Гравиметры наземные. Общие технические условия».
12. Инструкция по морской гравиметрической съемке. ИГ–78. МО РФ, ГУНиО. 1978.
13. **Басун О. Б., Грановский В. А., Сирая Т. Н., Сухарев А. П.** Метрологическое сопровождение разработки навигационных систем: постановка проблем, пути решения - Гироскопия и навигация, № 2 (41), 2003.
14. РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений».

ПРАКТИКА АТТЕСТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХЛАДОСТОЙКИХ СУДОСТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СВИДЕТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОГО МОРСКОГО РЕГИСТРА СУДОХОДСТВА

А. В. Ильин, В. Ю. Филин, М. А. Гусев, А. Ю. Маркадеева,
ФГУП "ЦНИИ КМ "Прометей" им. И.В. Горынина, С.-Петербург, РФ, e-mail nprk3@crism.ru

М. Е. Юрков

ФАУ "Российский морской регистр судоходства", С.-Петербург, РФ, e-mail yurkov.me@rs-class.org

Аннотация

Ключевые слова: арктические конструкции, сварные соединения, трещиностойкость, сертификация.

Аннотация: В России запланировано строительство нескольких ледоколов и крупногабаритных сварных конструкций, предназначенных для эксплуатации в арктических условиях, что потребовало освоения производства и сертификации отечественных высокопрочных свариваемых сталей в большой толщине. Сварные соединения таких материалов должны обладать достаточным запасом сопротивления хрупкому разрушению при экстремальных температурах эксплуатации. Обсуждаются методические проблемы достижения научно обоснованных критериев трещиностойкости сварных соединений на основании статистического анализа и математического моделирования.

Освоение арктического шельфа России требует постройки нефте- и газодобывающих платформ, магистральных трубопроводов и морского флота ледоколов и судов ледового плавания. Крупногабаритные сварные конструкции Крайнего Севера работают в особо суровых условиях, таких как сейсмическая активность, ветроволновые и ледовые нагрузки, коррозионное воздействие, а также экстремально низкие температуры до - 60 °С. Основными материалами для арктических конструкций по-прежнему остаются низколегированные высокопрочные свариваемые стали, особенностью которых является наличие вязко-хрупкого температурного перехода. Это обуславливает потенциальную опасность хрупких разрушений при климатических температурах эксплуатации в условиях, когда сложность конструкций растёт вместе с расстоянием до береговой инфраструктуры.

Для обеспечения надёжной и безотказной эксплуатации конструкций их основной металл и сварные соединения должны удовлетворять ряду особых требований: высокая прочность в сочетании с пластичностью, высокая вязкость и сопротивляемость хрупким разрушениям, коррозионно-механическая прочность. Требования предъявляются классификационными обществами, осуществляющими надзор и техническое наблюдение за арктическими конструкциями, начиная от проекта и изготовления материалов до освидетельствований в процессе эксплуатации. Российский морской регистр судоходства является ведущей российской организацией по разработке таких требований [1, 2] и их научному обоснованию совместно с ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей».

Выполнение программ Регистра аттестационных и сертификационных испытаний сталей и их сварных соединений, включающих определение критических температур хрупкости и трещиностойкости сварных соединений, проводится на протяжении двух десятилетий, что позволило накопить уникальный практический опыт и собрать статистически представительную информацию о материалах. Одновременно отработана методика испытаний, обеспечивающая выполнение условий корректности международно признанных стандартов (BS 7448, part 1; ISO 12135; ISO 15653, ASTM E1820, ASTM E2818 [3–7] и т.п.) по нагрузкам предварительного выращивания усталостной трещины, точности измерений в процессе испытания и интерпретации полученных результатов. В лаборатории «Прометей» работают только высококвалифицированные испытатели и специалисты по конструкционной прочности, что позволило 13 апреля 2016 года получить новое Свидетельство Регистра о признании.

Однако нельзя сказать, что все методические проблемы решены. При аттестации стального проката по свариваемости испытывают образцы на трещиностойкость и ударный изгиб с надрезом по зоне термического влияния (ЗТВ), в том числе крупнозернистой ЗТВ вблизи линии сплавления. Для изготовления таких образцов используют пробы, сваренные по специальной разделке с одной прямой кромкой, чтобы обеспечить достаточное присутствие требуемой структуры на фронте трещины. Тем не менее, не удаётся избежать присутствия и других структур, из которых наиболее проблемной является металл шва.

Неоднократно сообщалось о разработке новых материалов для дуговой сварки высокопрочных хладостойких сталей. Есть два типа таких материалов – высоколегированные аустенитного класса и низколегированные. Аустенитные материалы дороги, а кроме того, из-за разницы теплофизических свойств приводят к более длительному перегреву ЗТВ основного металла вблизи линии сплавления [8], что приводит к росту зерна и ухудшению свойств. Низколегированные материалы обладают тем же свойством наличия вязко-хрупкого перехода, что и основной металл, и при обеспечении равнопрочности с основным металлом имеют пониженную деформационную способность и хладостойкость.

Дополнительную трудность представляет необходимость соблюдать при сварке предписанные Регистром экстремальные уровни тепловложения (не выше 1,0 кДж/мм при полуавтоматической сварке и не менее 3,5 кДж/мм при автоматической), что выводит материалы из комфортной зоны оптимальных условий сварки, для которых при их аттестации была получена удовлетворительная трещиностойкость при низких температурах. В этих условиях, например, широко применяемая на судостроительных заводах аттестованная порошковая проволока DW-62L компании Kobelco для сварки в углекислом газе при испытаниях на трещиностойкость образцов металла шва толщиной 50 мм при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ показала уровень критического раскрытия в вершине трещины CTOD (0,07 – 0,13) мм; аттестованная комбинация проволоки PITTARC S3Ni1Mo с флюсом OERLIKON OP 121 TT-0,05–0,09 мм. Аналогичный, если не более низкий уровень трещиностойкости показали материалы для автоматической сварки Св-10ГН+48АФ61/10, ЭП934+48АФ61/8, и проволоки для полуавтоматической сварки Megafil 13R, Megafil 14R [9].

В результате, на фронте трещины в образце с надрезом по ЗТВ вблизи линии сплавления, как правило, присутствуют как минимум две структуры с предположительно пониженной трещиностойкостью, что затрудняет оценку «истинной» трещиностойкости стального проката при испытаниях на свариваемость (рисунок 1) [9].

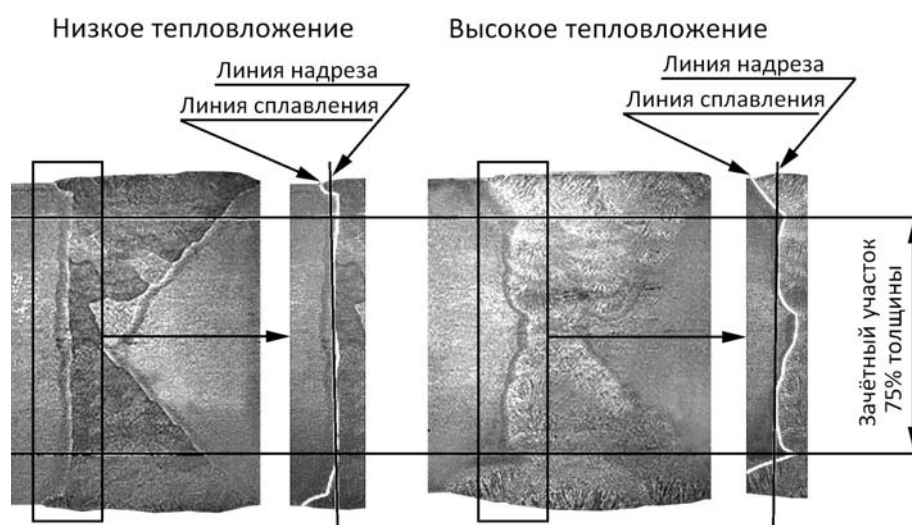


Рисунок 1 - Металлографические исследования на поперечных макрошлифах перед изготовлением образцов на трещиностойкость

Авторами в разное время были предложены несколько способов таких оценок. Самый простой - отбраковка результатов испытаний, когда на фронте трещины присутствует металл шва. Такой подход практически не может быть реализован из-за увеличения на порядок необходимого количества образцов.

Также был предложен «взвешенный» подход — учёт результатов с весовыми коэффициентами, пропорциональными доле крупнозернистой ЗТВ на фронте трещины [8], результаты применения которого показаны на рис. 2. Такой подход означает, что если трещина полностью располагается в критической структуре, экспериментально полученное значение *CTOD* имеет весомость 1, а если только 10% фронта трещины в пределах зачётного участка проходит по этой структуре, то экспериментальное значение для такого образца учитывается с коэффициентом 0,1. Интегральная вероятность разрушения *P*, представленная на рис. 2 утолщённой кривой, определялась при статистической обработке общего массива данных, полученных при одной температуре, по формуле

$$P_i(CTOD_i) = \frac{(i - 0.3)N}{i(N + 0.4)} \cdot \frac{\sum_{j=1}^i z_j}{\sum_{j=1}^N z_j}, \quad (1)$$

где *N* — число образцов в серии, *z_j* — процентная доля критической структуры по фронту трещины *j*-го образца, *CTOD_i* — величина *CTOD*, полученная для *i*-го образца, при условии, что образцы отсортированы по возрастанию *CTOD* (*CTOD_{i+1}* ≥ *CTOD_i*).

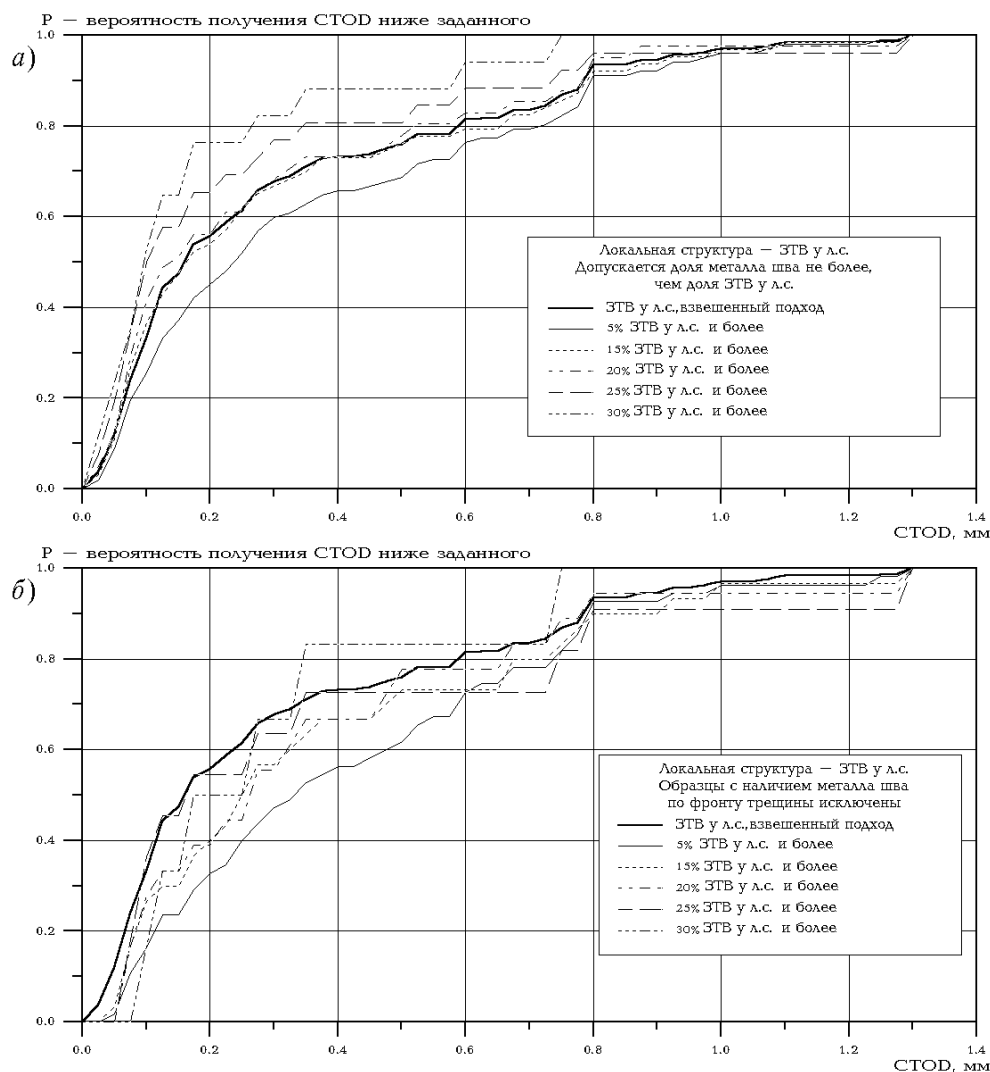


Рисунок 2 - Вероятностная оценка получения требуемой трещиностойкости крупнозернистой ЗТВ у линии сплавления: а – по всем образцам с наличием этой зоны на фронте трещины, б – с исключением образцов с долей металла шва. Жирная линия – оценка с применением весовых коэффициентов.

Как следует из рисунка 2, использование такого метода позволяет получить оценки *CTOD* для заданной вероятности разрушения, близкие к получаемым для предельно достижимого содержания крупнозернистой составляющей, а влияние наличия металла шва частично исключается (кривая «взвешенного» подхода, близкая к медианной на рис. 2,а, практически соответствует верхней огибающей на рисунке 2, б). Можно сравнить полученные величины с требованиями действующих Правил Регистра: для исследованных в [8] материалов (сталь E36Z толщиной до 40 мм) требуемый уровень *CTOD* составляет 0,15 мм среднее, 0,11 мм минимальное. Соответственно, получено, что медианное значение, соответствующее $P = 0,5$, составляет 0,18 мм, что удовлетворяет требованиям. При этом с вероятностью $1-P = 0,65$ не будет получено значений ниже 0,11 мм. К сожалению, и такие оценки требуют испытания достаточно большого количества образцов.

В связи с тем, что «взвешенный» подход недостаточно обоснован с точки зрения физики процесса, была поставлена задача математического моделирования разрушения при случайном попадании в ту или иную зону. В работе [9] предложено применение метода Монте-Карло, когда при известном уровне трещиностойкости металла шва «истинная» трещиностойкость ЗТВ у линии сплавления определяется сопоставлением результатов численного вероятностного эксперимента с данными испытаний.

Для построения модели процесса разрушения при случайном попадании в ту или иную зону, было необходимо определиться с законами, по которым распределяются вероятности попадания в металл шва и крупнозернистую ЗТВ при стандартной разметке надреза на образцах. Для этого построены гистограммы распределений процента попаданий в шов (рисунок 3) и в крупнозернистую ЗТВ (рисунок 4).

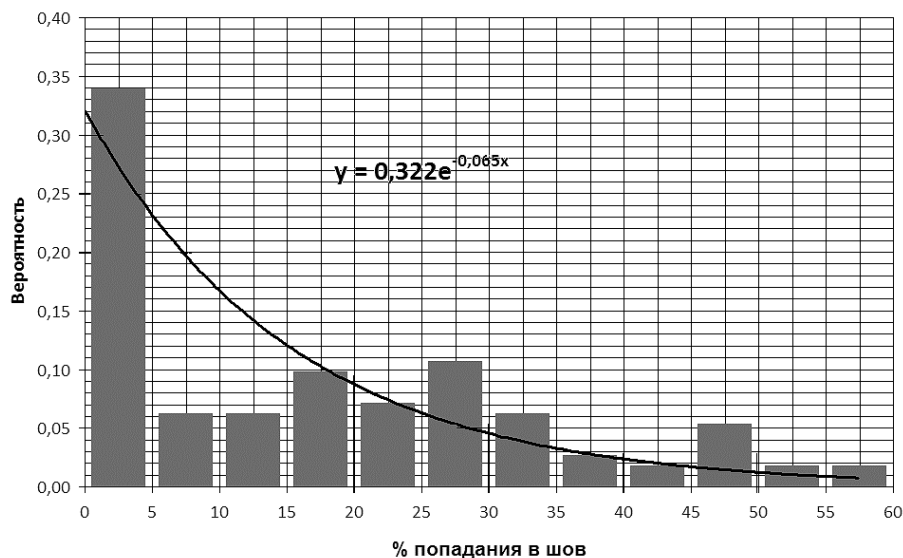


Рисунок 3 - Статистика попаданий в металл шва.

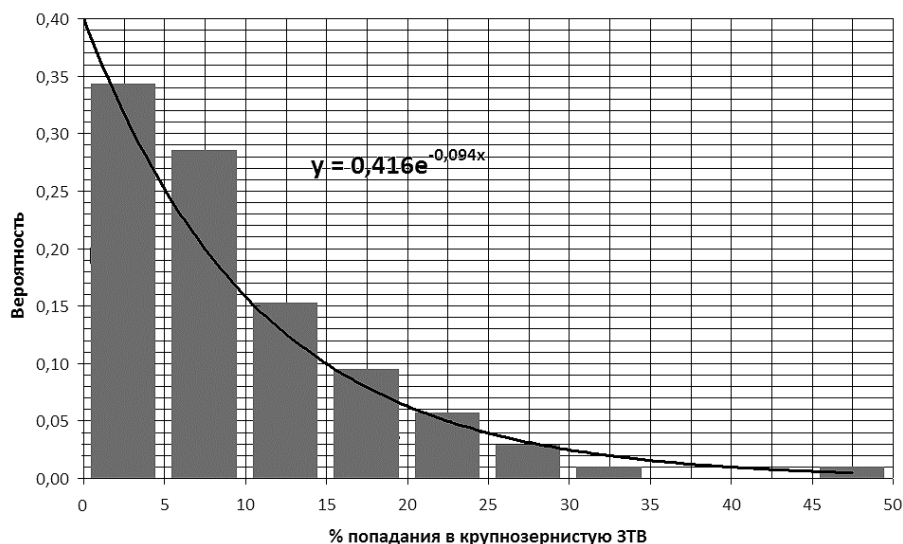


Рисунок 4 - Статистика попаданий в крупнозернистую ЗТВ.

Полученные распределения было решено аппроксимировать экспоненциальной функцией. В результате для расчета вероятности нахождения на фронте усталостной трещины металла шва определенной протяженности была составлена следующая формула:

$$P_2 = A_2 e^{-\left(\frac{l_2/L}{l_{20}/L}\right)} = 0.322 e^{-\left(\frac{l_2/L}{0.154}\right)}, \quad (2)$$

где P_2 – вероятность получения на фронте усталостной трещины металла шва протяженностью l_2 при толщине образца L ; A_2 и l_{20} – параметры распределения.

Аналогичное выражение было получено и для крупнозернистой ЗТВ:

$$P_1 = A_1 e^{-\left(\frac{l_1/L}{l_{10}/L}\right)} = 0.416 e^{-\left(\frac{l_1/L}{0.106}\right)}, \quad (3)$$

где P_1 – вероятность получения на фронте усталостной трещины крупнозернистой ЗТВ протяженностью l_1 при толщине образца L ; A_1 и l_{10} – параметры распределения.

В настоящее время для прогнозирования хрупких активно используется вероятностный подход на основе локальных критериев разрушения. В основу данного подхода легла модель, предложенная Veremín [10]. Основные положения модели заключаются в следующем:

1. Поликристаллический материал объемом V разбивается на элементарные объемы V_0 . При этом объем V_0 должен быть достаточно большим, так чтобы вероятность нахождения микротрещины

значимой длины не была крайне мала, и статистически независимым от соседних элементарных объемов. Иными словами, V_0 должен включать в себя определенное количество зёрен.

2. Для каждого объема V_0 вероятность P существования микротрещины длиной от l_0 до l_0+dl_0 задаётся в виде

$$P(l_0)dl_0 = (\alpha/l_0^\beta) dl_0, \quad (4)$$

где α и β – константы материала.

3. Критическая длина микротрещины l_0^c связана с критическим разрушающим напряжением S_c (или σ_c) соотношением Гриффитса

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi(1-\mu^2)l_0^c}}, \quad (5)$$

где E – модуль упругости, γ – поверхностная энергия.

4. Используется модель «слабого звена», вероятность разрушения объема V_0 при напряжении σ

$$p(\sigma) = \int_{l_0^c}^{\infty} P(l_0)dl_0 \quad (6)$$

Выразив l_0^c из уравнения (5), представляем (6) в виде

$$p(\sigma) = (\sigma/\sigma_u)^m, \quad (7)$$

где $m = 2\beta-2$ и σ_u – константы материала.

Накопленную вероятность разрушения P_f всего тела, разбитого на n объемов V_0 , можно представить как

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - p(\sigma_i)], \quad (8)$$

где i – порядковый номер объема V_0 .

Учитывая, что вероятность $p(\sigma_i)$ много меньше единицы, уравнение (8) можно записать в виде

$$\ln(1 - P_f) = \sum_{i=1}^n \ln[1 - p(\sigma_i)] \cong \sum_{i=1}^n -p(\sigma_i). \quad (9)$$

Если напряжённое состояние однородно во всём объеме тела, уравнение (9) с учетом (7) можно записать как

$$\ln(1 - P_f) = -\frac{V}{V_0} (\sigma/\sigma_u)^m. \quad (10)$$

Окончательный вид уравнения для вычисления вероятности разрушения:

$$P_f = 1 - \exp[-(\sigma_w/\sigma_u)^m], \quad (11)$$

где $\sigma_w = m \sqrt{\sum_{j=1}^n (\sigma_j)^m \frac{V_j}{V_0}}$ – напряжения Вейбулла.

В терминах коэффициентов интенсивности напряжений уравнение (11) может быть записано следующим образом [11]:

$$P_f = 1 - \exp[-(K_1/K_0)^m]. \quad (12)$$

Для основного металла распределение вероятности разрушения образцов при испытаниях на трещиностойкость хорошо описываются выражением (11), а параметр формы m при этом равен 4 [12]. Переходя к параметру CTOD и учитывая, что $\delta_{cr} \sim K_{1C}^2$, получаем [13]:

$$P_f = 1 - \exp[-(\delta_{cr}/\delta_0)^2]. \quad (13)$$

С учетом выражений (10) и (13) запишем уравнение для расчёта интегральной вероятности разрушения образца учётом протяженности хрупкой составляющей z на фронте усталостной трещины длиной S , равной толщине образца, которое будет использоваться при построении модели:

$$P_f = 1 - \exp[-(\delta_{cr}/\delta_0)^2 \cdot z/S]. \quad (14)$$

Программа численного моделирования процесса разрушения базируется на принципе метода Монте-Карло. Программа позволяет провести N численных экспериментов при варьировании трещиностойкости отдельных структурных составляющих с целью изучения их влияния на результат испытаний.

При разработке алгоритма были приняты следующие допущения:

1. Попадание в участок определённой протяжённости крупнозернистой составляющей ЗТВ и металла шва описывается зависимостями (3) и (4) с применением генератора случайных чисел.

2. На фронте усталостной трещины может располагаться три участка: а) металл шва, б) крупнозернистая ЗТВ, в) участок, близкий по трещиностойкости к основному металлу.

3. За критическое значение трещиностойкости принимается минимальное из рассчитанных значений трещиностойкости для каждого участка с учётом его протяженности с использованием формулы (14) и генератора случайных чисел.

Варируя параметры масштаба δ_{10} (среднее значение $CTOD$ ЗТВ), δ_{20} (среднее значение $CTOD$ металла шва), δ_{30} (среднее значение $CTOD$ основного металла) и оставляя при этом неизменным показатель степени, равный 2, с помощью специально созданного программного обеспечения проведено численное моделирование ряда экспериментов с большим количеством опытов (порядка 10000) для получения статистически представительного объёма данных.

В результате получены массивы критических значений $CTOD$ для различных комбинаций варьируемых параметров. Для оценки характера распределения полученных результатов были построены гистограммы, примеры которых представлены на рисунке 5.

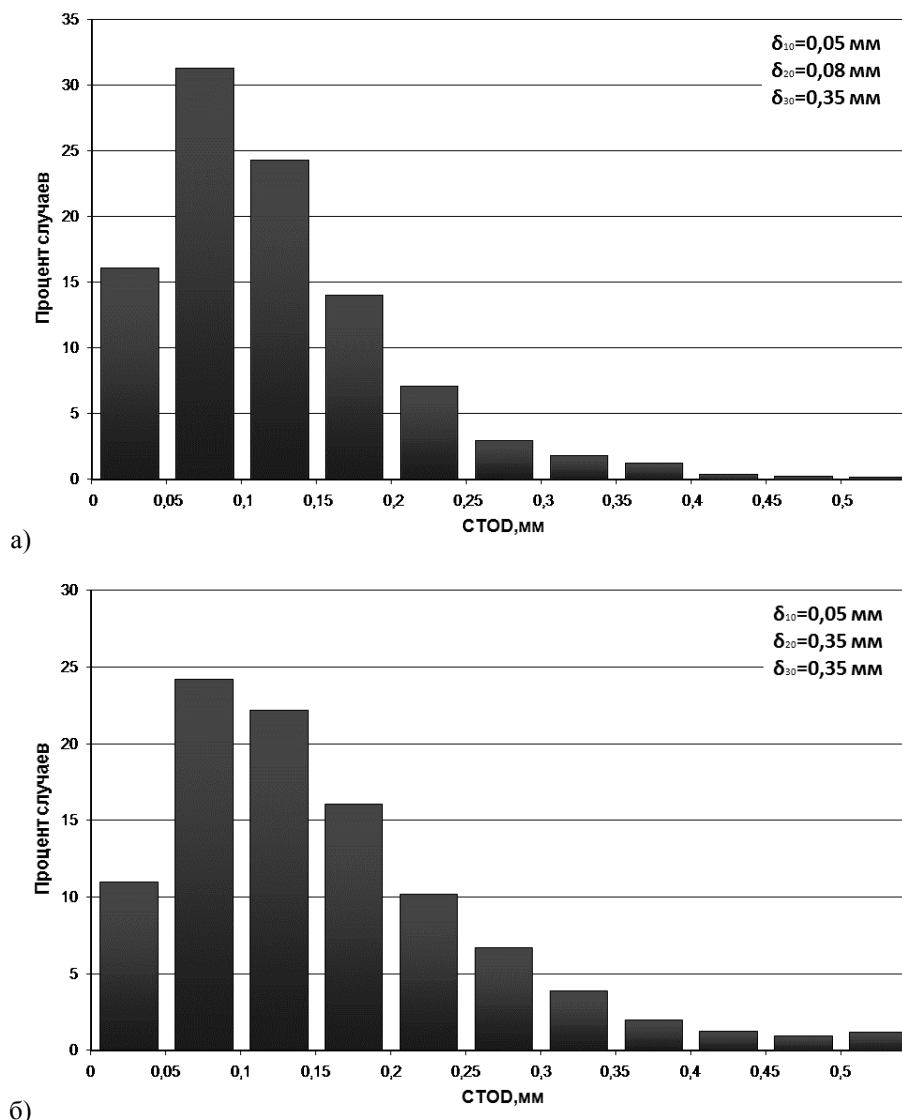


Рисунок 5 - Гистограммы распределения $CTOD$: а) трещиностойкость металла шва значительно ниже, чем у основного металла; б) трещиностойкость металла шва равна трещиностойкости основного металла.

Затем вычисляли параметры распределения Вейбулла для всех смоделированных программой случаев, путем построения аппроксимирующих прямых. На рисунке 6 представлены примеры линейных аппроксимаций для случаев, рассмотренных на рисунке 5.

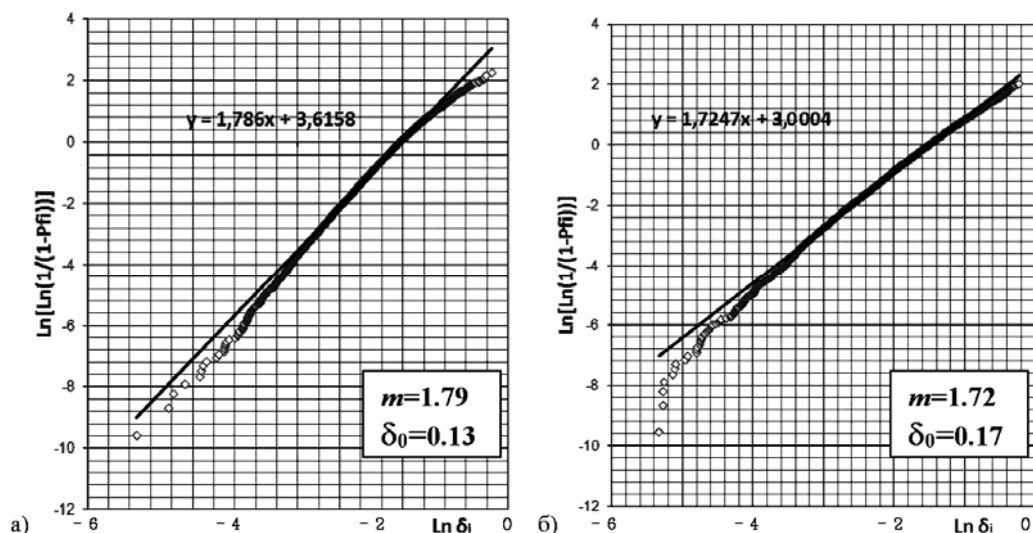


Рисунок 6 - Примеры линейных аппроксимаций результатов моделирования: а) трещиностойкость металла шва значительно ниже, чем у основного металла; б) трещиностойкость металла шва равна трещиностойкости основного металла.

Результаты проведенных численных экспериментов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

δ_{10} , мм (ЗТВ)	δ_{20} , мм (металл шва)	δ_{30} , мм (основной металл)	m	δ_0 , мм (медианное значение «истинной» трещиностойкости ЗТВ)
0,001	0,08	0,35	1,387	0,005
0,01			1,498	0,042
0,03			1,698	0,099
0,05			1,786	0,132
0,08			1,812	0,162
0,16			1,827	0,192
0,001	0,35		1,390	0,005
0,01			1,451	0,045
0,03			1,587	0,118
0,05			1,720	0,174
0,08			1,825	0,228
0,16			1,960	0,302
0,35	0,35	0,35	1,996	0,350
0,08	0,001	0,35	1,383	0,004
	0,01		1,451	0,036
	0,03		1,630	0,092
	0,05		1,754	0,129
	0,08		1,819	0,163
	0,16		1,851	0,202
0,35	0,001		1,365	0,004
	0,01		1,425	0,037
	0,03		1,570	0,103
	0,05		1,663	0,155
	0,08		1,776	0,207
	0,16		1,930	0,292
0,03	0,08	1,0	1,615	0,105
0,05			1,686	0,146
0,08			1,718	0,185
0,16			1,682	0,229

Представленные данные позволяют сделать следующие выводы:

1. Параметр формы распределения трещиностойкости сварного соединения зависит от различия средних значений «хрупкой» и «вязкой» составляющих: получение значений m , существенно меньших 2, характерно для больших различий δ_{10} и δ_{30} как следствие перемешивания структур на фронте трещины.

2. По результатам испытаний в рамках программы Регистра на свариваемость практически невозможно определить, обладает ли пониженной трещиностойкостью сам металл шва. Для получения достоверных оценок трещиностойкости металла ЗТВ необходимо предусмотреть испытания образцов с надрезом по металлу шва, как это сделано при испытаниях на ударный изгиб.

3. Медианные значения «истинной» трещиностойкости металла ЗТВ оказываются существенно ниже экспериментально получаемых на образцах. Так, для экспериментального среднего значения $CTOD$ ЗТВ $\delta_0 = 0,22$ мм «истинное» среднее при наиболее правдоподобном из исследованных сочетаний характеристик трещиностойкости основного металла и металла шва составляет $\delta_{10} = 0,16$ мм, а в случае получения экспериментального значения $\delta_0 = 0,10$ мм оно будет равно $\delta_{10} = 0,03$ мм.

Таким образом, избыточный консерватизм, связанный с применением изгибных образцов полной толщины, в некоей мере компенсируется методической погрешностью определения «истинной» трещиностойкости металла ЗТВ. Очевидно, что исследования в данном направлении должны быть продолжены. Планируется проведение численных экспериментов для статистически представительного количества партий сварных образцов и сравнение результатов применения «взвешенного» подхода и определения «истинной» трещиностойкости металла крупнозернистой ЗТВ вблизи линии сплавления. По результатам расчётов могут быть сделаны рекомендации для включения в Правила Регистра.

Не до конца выясненной остаётся также следующая проблема, непосредственно связанная с основной темой доклада: с позиций гипотезы слабого звена фактором, определяющим трещиностойкость, является суммарное количество хрупкой составляющей вне зависимости от её распределения по фронту трещины, в то время как с позиций энергетического подхода трещиностойкость связана с наличием сплошного участка слабой структуры. Поэтому необходимо дополнительно обосновывать критерий корректности результата по минимально допускаемой доле требуемой структуры на фронте трещины, то есть начиная с какого содержания её пониженные свойства адекватны интегральному поведению образца при испытании.

Ранее был выполнен специальный эксперимент [8], показавший, что при наличии одного участка ослабленной структуры до 5 % влияние не наблюдается, от 5 до (10 – 15) % влияние нарастает, и показываемая образцом трещиностойкость спускается практически до нижнего шельфа, соответствующего 100 % содержанию критической структуры. К аналогичному выводу в своё время пришли авторы ныне отменённого стандарта BS 7191 [10], устанавливавшего нижнюю границу доли требуемой структуры на фронте трещины на уровне 15 %, что соответствует и действующей редакции Правил Регистра [1, 2]. Данный критерий также может быть проверен в ходе запланированных численных экспериментов. Однако до сих пор не ясно, что происходит при наличии на фронте трещины нескольких участков критической структуры, и как это связано с местом старта нестабильного разрушения.

Литература

1. НД №2-020101-087. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XIII «Материалы». Российский морской регистр судоходства, СПб, 2016-166с.
2. НД №2-020201-013. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ: Российский морской регистр судоходства, СПб, 2014-491с.
2. BS 7448-1:1991. Fracture mechanics toughness tests. Method for determination of K_{Ic} , critical $CTOD$ and critical J values of metallic materials.
4. ISO 12135:2002 Metallic materials- Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness.
5. ISO 15653:2010 Материалы металлические. Метод определения квазистатической трещиностойкости (вязкости разрушения) сварных швов.
6. ASTM E1820-15a. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
7. ASTM E2818-11. Standard Practice for Determination of Quasistatic Fracture Toughness of Welds.
8. **Филин, В. Ю.** Оценка сопротивления хрупкому разрушению металла сварных соединений конструкционных сталей с учётом структурной неоднородности: диссертация на соискание учёной степени канд. техн. наук: ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», СПб, 2008.-203с.
9. **Маркадеева, А. Ю.** Исследование трещиностойкости металла зоны термического влияния сварных соединений судостроительных сталей высокой прочности при низких температурах: магистерская диссертация: СПбПУ им. Петра Великого, СПб, 2016.-117с.
10. **Beremin F. M.** A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel//Metallurgical transactions A.-1983.-Vol.14A.-pp.2277-2287.
11. **Wallin K.** The scatter in K_{Ic} – results//Engineering fracture mechanics.-1984.-Vol.19.-No.6.-pp.1085-1093.
12. **Ильин, А. В., Филин, В. Ю.** Применение расчетных оценок прочности с использованием механики разрушения для сварных конструкций глубоководной техники//Деформация и разрушение, № 2, 2012 г. С. 9-15.
13. **Ильин, А. В., Леонов, В. П., Филин, В. Ю.** Определение параметров трещиностойкости $CTOD$ для металла сварных соединений судокорпусных сталей при низких климатических температурах//Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства.-2008.-Вып.32.-С.120-146

ИСПЫТАНИЯ В ЦЕЛЯХ УТВЕРЖДЕНИЯ ТИПА КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ОТ $5 \cdot 10^{-9}$ ДО $1 \cdot 10^{-6}$ М

В. Л. Федорин¹, З. В. Фомкина²

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», С.-Петербург, РФ, e-mail: ¹V.L.Fedorin@vniim.ru,
²Z.V.Fomkina@vniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: нанодиапазон, интерферометр, пьезоплатформа

В докладе на примере проведенных испытаний в целях утверждения типа комплекса для измерений перемещений в диапазоне от $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м представлены возможности ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в области измерений в субмикронном и нанодиапазоне. Представлено описание лазерного интерференционного компаратора для измерений длины в субмикронном и нанодиапазоне № 01-2010 из состава Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010. Приведены основные результаты испытаний.

Введение

Одной из наиболее актуальных задач на сегодняшний день является метрологическое обеспечение средств измерений, работающих в микро- и нанодиапазоне. В последние годы интенсивно ведется разработка и создание новых высокоточных средств измерений линейных размеров и суперпрецизионных перемещений объектов в нанометровом диапазоне с предельно достижимой степенью точности, а также методов и средств их калибровки. Измерение сверхмалых перемещений необходимо для проведения фундаментальных и прикладных работ, связанных с созданием нового поколения средств измерений, основанных на принципах растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии, при исследовании квантово-размерных эффектов, аттестации и калибровке систем сканирования и позиционирования микро- и нанодиапазонов [1].

Состав и описание комплекса специализированного метрологического СпМК

Комплекс специализированный метрологический СпМК (далее комплекс) предназначен для измерений перемещений в диапазоне от $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ м.

Работа комплекса основана на интерференционном методе.

В состав комплекса входят следующие составные части:

- интерферометр с блоком цифровой обработки (далее интерферометр);
- видеоконтрольное устройство OITEZ DP-M17;
- наностол в составе:
- пьезоплатформа P-611.1S;
- контроллер E-665.SR;
- программное обеспечение PIMikroMove;
- стол виброизоляционный;
- персональный компьютер;
- программное обеспечение.

Интерферометр размещается на виброизоляционном столе и предназначен для измерений перемещений. Для визуализации процесса измерений используется видеоконтрольное устройство.

Персональный компьютер, входящий в состав комплекса, представляет собой программный модуль, обеспечивающий выполнение технологического цикла автоматизированной подготовки и ввода настроек, обработки данных, а также формирование отчетной информации.

Для калибровки интерферометра в состав комплекса включен наностол.

Общий вид комплекса представлен на рисунке 1. Внешний вид интерферометра из состава комплекса представлен на рисунке 2.

Основой комплекса является интерферометр с диапазоном измерений от 5 до 1000 нм. Заявленные пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений перемещений комплекса составляют ± 5 нм. В качестве меры сравнения используется пьезоплатформа P-611.1S с диапазоном перемещений от 0 до 100 мкм. Заявленные пределы допускаемой абсолютной погрешности перемещений пьезоплатформы P-611.1S составляют ± 2 нм.

¹ Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

² Инженер.



Рисунок 1 - Общий вид комплекса

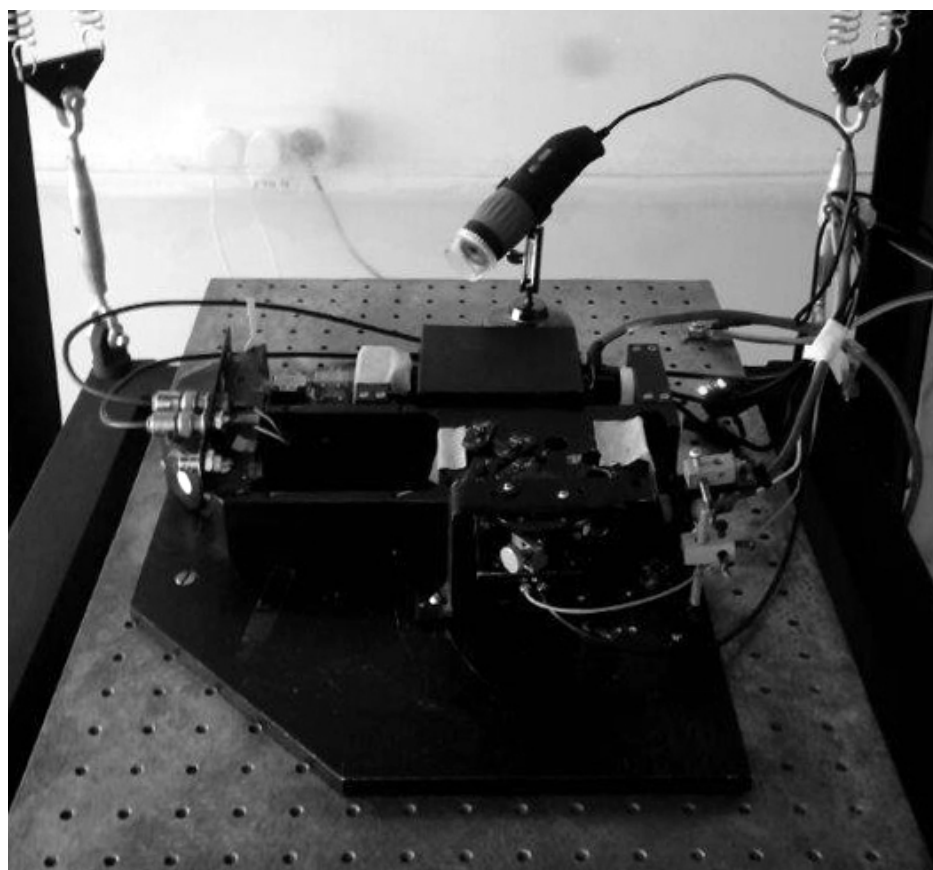


Рисунок 2 - Внешний вид интерферометра из состава комплекса

Внешний вид пьезоплатформы Р-611.1S приведен на рисунке 3.

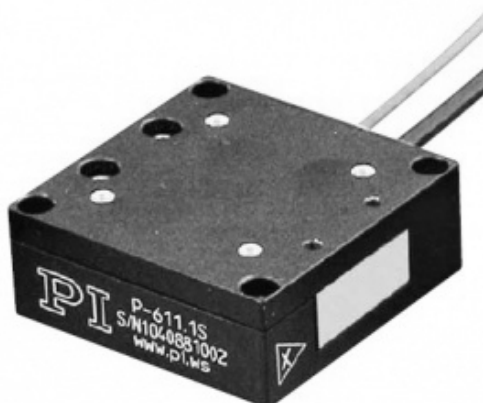


Рисунок 3 - Внешний вид пьезоплатформы P-611.1S

Экспериментальные исследования

Испытания проводились с помощью лазерного интерференционного компаратора для измерений длины в субмикронном и нанодиапазоне № 01-2010 из состава Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 (далее компаратора), предназначенного для передачи единицы длины в указанные диапазоны. Компаратор установлен на виброзащитном столе. В состав компаратора входят частотно-стабилизированный лазер, электрооптический модулятор, оптико-механическую систему, систему измерений параметров окружающей среды, персональный компьютер с программным обеспечением [2]. Среднеквадратическое отклонение передачи единицы длины компаратором не превышает 0,1 нм. Общий вид компаратора представлен на рисунке 4.

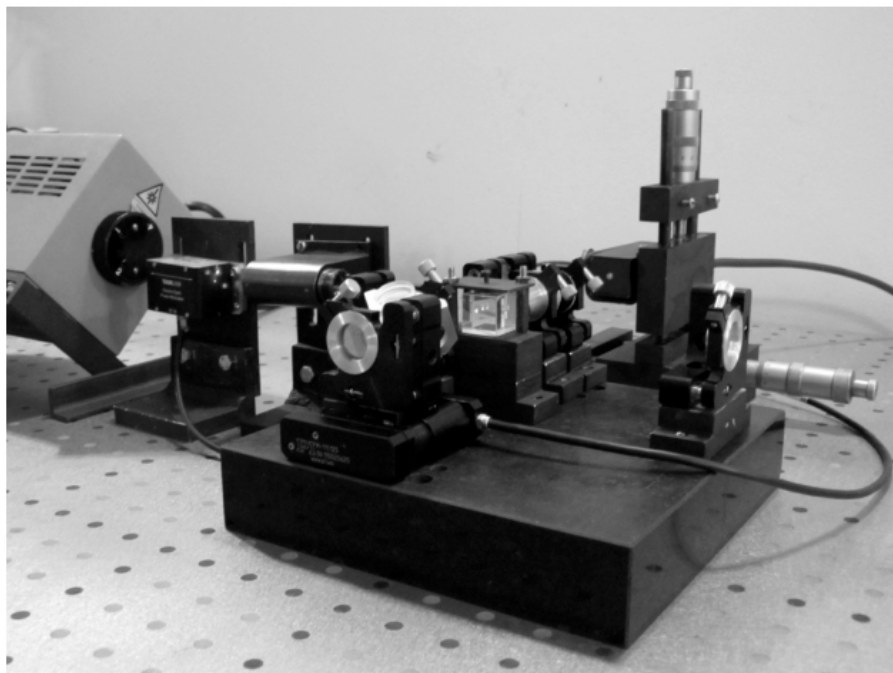


Рисунок 4 - Внешний вид лазерного интерференционного компаратора для измерения длины в субмикронном и нанодиапазоне

С помощью компаратора от Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 единицу длины передают пьезоплатформе P-611.1S. Для чего с помощью контроллера E-665.SR задают перемещения от 0 до 1 мкм и одновременно проводят измерения заданных перемещений, используя компаратор. Данные измерения проводят в начале, середине и конце диапазона перемещений пьезоплатформы. На каждом участке диапазона измерения проводят не менее пяти раз.

Определение диапазона перемещений и абсолютной погрешности измерений перемещений комплекса проводят, используя в качестве меры сравнения пьезоплатформу P-611.1S. Для этого

последовательно задают перемещения пьезоплатформы в диапазоне измерений с шагом 100 нм. Данные измерения проводят в начале, середине и конце диапазона перемещений пьезоплатформы. Затем задают перемещение в противоположном направлении и повторяют процедуру. На каждом участке диапазона измерения проводят не менее пяти раз.

Основные результаты

В таблице 1 приведены результаты калибровки пьезоплатформы Р-611.1S во всем диапазоне перемещений.

Таблица 1

Заданное перемещение, мкм	Измеренные значения перемещения, мкм					Действительное значение перемещения, мкм	Абсолютная погрешность перемещений, нм
0,00011	0,00006	0,00011	0,00103	0,00022	0,00015	0,00031	-0,20
3,48050	3,47995	3,48443	3,47889	3,47860	3,48340	3,48105	-0,55
7,27741	7,27152	7,27880	7,27823	7,27622	7,28460	7,27787	-0,46
14,23842	14,25440	14,22642	14,23843	14,23841	14,23841	14,23921	-0,79
31,00821	31,00134	31,01045	31,00803	31,01204	31,00204	31,00678	+1,43
47,77820	47,78567	47,76654	47,78952	47,77810	47,76345	47,77666	+1,54
63,91482	63,90834	63,91903	63,91885	63,91732	63,91278	63,91526	-0,44
88,59481	88,58300	88,60012	88,59368	88,59465	88,59287	88,59286	+1,95
94,92322	94,90843	94,93373	94,92310	94,93108	94,92940	94,92515	-1,93
99,60725	99,60001	99,59901	99,61880	99,62112	99,58830	99,60545	1,80

В таблице 2 приведены результаты калибровки пьезоплатформы Р-611.1S в диапазоне, необходимом для передачи единицы длины интерферометру из состава комплекса.

Таблица 2

Заданное перемещение, мкм	Измеренные значения перемещения, мкм					Действительное значение перемещения, мкм	Абсолютная погрешность перемещений, нм
0,00013	0,00005	0,00121	0,00001	0,00047	0,00003	0,00035	-0,22
0,15821	0,15725	0,15620	0,16018	0,15923	0,15721	0,15801	+0,20
0,31642	0,31234	0,31840	0,31855	0,31647	0,31786	0,31672	-0,30
0,63283	0,63180	0,63446	0,62987	0,63302	0,63181	0,63219	+0,64
0,94925	0,94845	0,95327	0,94901	0,94489	0,94628	0,94838	+0,87

В таблице 3 приведены результаты определения диапазона и абсолютной погрешности комплекса.

Таблица 3

Заданное перемещение, нм	Перемещение, измеренное с помощью комплекса, нм	Абсолютная погрешность измерений перемещений, нм
1	2	3
Прямой ход		
100	101,5	+1,5
200	204,5	+4,5
300	305,0	+5,0
400	395,5	-4,5
500	500,5	+0,5
600	603,0	+3,0
700	698,0	-2,0
800	803,0	+3,0

Окончание таблицы 3

Заданное перемещение, нм	Перемещение, измеренное с помощью комплекса, нм	Абсолютная погрешность измерений перемещений, нм
900	895,5	-4,5
1000	1001,0	+1,0
Обратный ход		
1	2	3
100	95,5	-4,5
200	200,0	0,0
300	304,0	+4,0
400	304,5	+4,5
500	499,0	-1,0
600	605,0	+5,0
700	704,5	+4,5
800	802,0	+2,0
900	903,0	+3,0
1000	998,0	-2,0

Выводы

В ходе проведения испытаний ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» были подтверждены заявленные метрологические характеристики комплекса. Приказом № 800 «Об утверждении типов средств измерений» от 28 июня 2016 года комплекс специализированный метрологический СпМК был утвержден в качестве средства измерений.



Рисунок 5 - Свидетельство об утверждении типа комплекса специализированного метрологического СпМК

Основные метрологические и технические характеристики комплекса, включая показатели точности, приведены в таблице 4.

Таблица 4

Наименование характеристики	Значение характеристики
1	2
Диапазон измерений перемещений, м	от $5 \cdot 10^{-9}$ до $1 \cdot 10^{-6}$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений перемещений при многократных измерениях (не менее пяти раз), нм	± 5
Диапазон перемещений пьезоплатформы Р-611.1S, м	от 0 до $100 \cdot 10^{-6}$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности перемещений пьезоплатформы Р-611.1S при многократных измерениях (не менее пяти раз), нм	± 2
1	2
Масса, кг, не более	300
Габаритные размеры, мм, не более	1700x1100x1100
Питание от сети переменного тока с параметрами: - напряжение, В - частота, Гц	220 \pm 22 50 \pm 1
Потребляемая мощность, Вт, не более	500
Средний срок службы, лет	5
Средняя наработка на отказ, ч	10000
Условия эксплуатации: - диапазон температур окружающего воздуха, °С - диапазон относительной влажности воздуха, % - диапазон атмосферного давления, кПа.	20 \pm 5 65 \pm 15 от 86 до 106

В ходе проведения испытаний разработана и утверждена методика поверки «Комплекс специализированный метрологический СпМК. Методика поверки. МП 2511/0009-15».

Литература

1. Дарзбек, С. А., Желкобаев, Ж., Календин, В. В., Новиков, Ю. А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. – 2006. – Том 62. – С. 14 – 35.
2. Александров, В. С., Захаренко, Ю. Г., Кононова, Н. А., Лейбенгардт, Г. И., Федорин, В. Л., Чекирда, К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 // Измерительная техника. № 6. – 2012. – С. 3 – 7.

ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ АТТЕСТАЦИИ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИМИТАТОРОВ ДВИЖЕНИЯ

К. С. Гороховский¹, Н. Л. Яворовская², О. А. Яковенко³

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ
т.+7(812) 499-83-37, ф.+7(812) 499-81-53, e-mail: office@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: аттестация испытательного оборудования, высокоточные имитаторы движения

В докладе авторами рассмотрен вопрос аттестации различных видов испытательного оборудования. Особое внимание уделено вопросу аттестации высокоточных имитаторов движения, как наиболее значимых и сложных в области навигации управления движением. Представлены основные параметры указанного вида оборудования, определяемые в ходе аттестации. А также рассмотрен вопрос повышения точности оценки одного из важнейших параметров – погрешности позиционирования.

Производство новых высокотехнологичных навигационных приборов связано с необходимостью использования современного испытательного оборудования. В соответствии с действующими стандартами ГОСТ РВ 0008-002-2013, ГОСТ Р 8.568-97, ГОСТ РВ 8.570-98 к испытательному оборудованию предъявляются жесткие требования по аттестации.

Метрологическая служба АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (далее МС ЦНИИ) аккредитована на право проведения аттестации испытательного оборудования в сфере обороны и безопасности. В соответствии с областью аккредитации МС ЦНИИ выполняет в интересах собственного производства и сторонних организаций аттестацию следующих видов оборудования:

- стенды для воспроизведения периодических угловых движений (одноосные, двухосные, трехосные): диапазон воспроизведения угла поворота вокруг любой оси от 0 до 360°, погрешность воспроизведения угла поворота $\pm 2''$, диапазон воспроизведения угловой скорости ± 10000 %/с, погрешность воспроизведения угловой скорости $\pm 0,001$ %;

- углозадающие устройства поворотные: диапазон воспроизведения угла поворота и наклона от 0 до 360°, погрешность воспроизведения угла поворота и наклона $\pm 2''$;

- стенды вертикального перемещения: диапазон воспроизведения перемещения $\pm 2,5$ м, погрешность воспроизведения перемещения ± 5 %;

- камеры климатические: диапазон воспроизведения температуры от минус 75 до 195 °С, погрешность воспроизведения температуры $\pm 0,1$ °С по времени, $\pm 0,5$ °С по объему, диапазон воспроизведения относительной влажности от 0 до 100 %, погрешность воспроизведения относительной влажности ± 3 %;

- термобарокамеры: диапазон воспроизведения давления от давления окружающей среды до 0,1 кПа, погрешность воспроизведения давления ± 3 %, но не более $\pm 0,1$ кПа;

- стенды вибрационные: диапазон воспроизведения частоты от 0,5 до 4000 Гц, погрешность воспроизведения частоты $\pm 0,5$ Гц (на частотах ниже 25 Гц), ± 2 % (на частотах 25 Гц и выше), диапазон воспроизведения виброускорения до 1000 м/с², погрешность воспроизведения виброускорения ± 15 %;

- центрифуги, в том числе с сателлитным столом: диапазон воспроизведения ускорения до 10000 м/с², погрешность воспроизведения ускорения $\pm 0,1$ %;

- стенды ударные: диапазон воспроизведения пикового ударного ускорения до 10000 м/с², погрешность воспроизведения пикового ударного ускорения ± 10 %, диапазон воспроизведения длительности ударного импульса до 100 мс, погрешность воспроизведения длительности ударного импульса ± 10 %;

- стенды для испытаний образцов ВВТ и их составных частей – аттестация на соответствие техническим характеристикам, установленным в ТЗ, ТУ, КД и ЭД на стенды, диапазоны и точность воспроизведения характеристик определяются оснащённостью МС.

Следует отметить, что из перечисленных видов испытательного оборудования наиболее востребованным и значимым в области навигации и управления движением являются высокоточные имитаторы движения. Причем аккредитацию на аттестацию этого вида оборудования имеет ограниченное число организаций. Эти устройства обеспечивают проведение калибровки навигационных приборов и систем, а также проведение испытаний изделий на воздействие механических и температурных факторов (большинство из них укомплектовано термокамерой).

Наша организация имеет опыт аттестации высокоточных имитаторов движения следующих производителей: Acutronic (Швейцария), IXblue Motion Systems (Франция), Acuitas (Швейцария), Actidyn (Франция).

¹ Инженер 2 категории

² Начальник группы

³ Инженер 1 категории

К основным аттестуемым характеристикам указанного вида оборудования относятся:

- погрешность позиционирования;
- повторяемость позиционирования;
- погрешность задания угловой скорости вращения за оборот;
- стабильность угловой скорости вращения за оборот;
- неортогональность осей.

Более подробно следует остановиться на параметре – погрешность позиционирования, так как он является базовой характеристикой для имитатора. В соответствии с областью аккредитации и аттестованной методикой мы можем определить указанный параметр в пределах $\pm 2''$. Для оценки погрешности позиционирования используются фотоэлектрический автоколлиматор TriAngle TA 500-57 и мера плоского угла призматическая 4-36-0 (36-гранная). Для повышения точности результатов измерений при задании углов вводятся поправки, приведенные в свидетельстве о поверке меры плоского угла призматической. Таким образом, погрешность методики измерений погрешности позиционирования находится в пределах $\pm 0,7''$. Указанная методика аттестована МС ЦНИИ.

В настоящее время в связи с повышением уровня точности навигационной аппаратуры остро встает задача аттестации поворотных устройств с погрешностью позиционирования $\pm 1,0''$. Для оценки указанного параметра может быть применена методика калибровки круговых шкал, которая легла в основу работы [1]. Методика представляет собой специальным образом организованный цикл избыточных измерений. Помимо этого процедура характеризуется разбиением на серии, контролем качества получаемых данных и сложной обработкой с применением метода наименьших квадратов. Таким образом, данная методика позволяет за счет многократных измерений повысить точность определения предельной погрешности позиционирования.

**Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00801).**

Литература

1. Кудрявцев, М. Д., Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 + 05.11.15: защищена 29.12.09: утв. 09.04.10 / Кудрявцев Михаил Дмитриевич. – М., 2010. – 172 стр.

МАЛОГАБАРИТНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВОГО МОРСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

А. П. Смирнов¹, К. К. Басалаев²

АО “НПФ “Диполь”, Москва, РФ, e-mail: msk@dipaul.ru

Аннотация

Ключевые слова: радиопомехи, электромагнитная совместимость, реверберационная камера

Рассматриваются результаты исследований характеристик испытательной установки для оценки помехоустойчивости морского оборудования на основе реверберационной камеры. Приведены результаты измерений калибровочных коэффициентов, в том числе с учетом влияния объекта испытаний. Показаны потенциальные возможности и преимущества по сравнению с традиционными конфигурациями испытательных систем. Обоснован существенный экономический выигрыш при выборе подобного состава испытательной установки.

Введение

Среди проверок в области оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) оценка устойчивости к излучаемым помехам является наиболее инструментально и экономически затратной областью испытаний. Особенно важными данные испытания являются для объектов, чье целевое применение характеризуется высокой плотностью радиотехнических средств, например, морского оборудования. Нормативные требования к данным испытаниям и жесткости испытаний приведены в ряде национальных стандартов для продукции общего применения [1-3]. Более жесткие требования применяют к продукции специального назначения, основываясь, например, на стандартах серии MIL STD 461. Анализ стандартов показывает, что требования к устойчивости выражаются в создании напряженности поля до 36 В/м в диапазоне частот от 80 до 2000 МГц (с учетом модуляции и вариации поля) для продукции общего применения и до 200 В/м в диапазоне частот от 2 МГц до 18 (40) ГГц для продукции специального назначения.

Традиционная конфигурация испытательной системы (ИС) для проверки устойчивости ТС к излучаемым помехам включает в себя широкополосный генератор, комплект усилителей мощности и набор излучающих антенн. Расчеты и опыт испытаний показывает, что для создания стандартизованных режимов испытаний бортовых систем на частотах до 1 ГГц требуются усилители мощности до единиц киловатт, а на частотах от 1 до 18 ГГц – до сотен ватт. Предлагаемый на рынке ассортимент усилителей обеспечивают необходимую мощность. Однако их высокая стоимость определяет значительную итоговую дороговизну ИС подобной конфигурации. Кроме того, существенную добавляет безэховая камера, внутри которой следует размещать такое оборудование. В некоторой степени указанные недостатки исключают генераторы поля плоской электромагнитной волны типа ГТЕМ-камер. Применительно к ним требуемая мощность может быть снижена на 20-40 %, а закрытый характер самой полеобразующей системы позволяет избежать применения безэховой камеры. Однако высота рабочей зоны не превышает одной трети высоты камеры. Это делает проблематичными испытания объектов с габаритными размерами порядка 1 м. Поэтому в настоящее время развиты альтернативные испытательные системы, основанные на применении реверберационных камер (РК) и дающие существенный выигрыш в напряженности создаваемого поля в аналогичном рабочем объеме. Такие альтернативные системы испытаний активно используются за рубежом, а в России подобные системы не нашли должного применения, что отчасти связано с некоторым скептическим отношением к их характеристикам. Поэтому ожидается, что первый опыт аттестации и применения подобных систем в России будет представлять теоретический практический интерес.

Испытательная установка для оценки помехоустойчивости

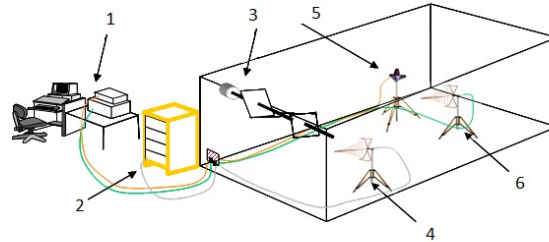
Рассматриваемая конфигурация испытательной системы принципиально не отличается от аналогичных систем, создающих непосредственное облучение объекта испытаний заданным электромагнитным полем. В данном случае она включает источник сигнала, усилитель мощности, передающую антенну и собственно РК (Рисунок 1). Как для любой испытательной системы основными требованиями являются создание требуемой напряженности поля и обеспечение требуемой однородности поля в пределах рабочего объема или пространства объекта испытаний. Выполнение указанных требований в системах с РК обусловлено физическими принципами работы РК.

Физической моделью РК является прямоугольный объемный многомодовый резонатор с хорошо отражающими стенками. Как известно, в подобных идеальных структурах создание электромагнитного

¹ Доктор технических наук, руководитель направления ЭМС и радиоизмерений.

² Технический специалист, аспирант.

поля возможно на частотах, совпадающих с модами резонатора. Реально существующие потери в РК приводят к тому, что возбуждение возможно и на частотах в окрестности моды, тем самым сохраняя резонансный эффект. Если плотность мод в окрестности частоты возбуждения высока, то результирующее поле уже является суммой мод. При соизмеримости их амплитуд создаваемое поле оказывается в среднем однородным для некоторой частоты возбуждения. Для обеспечения широкого рабочего частотного диапазона внутри РК располагается лопастообразный смеситель. Его вращение приводит к изменению и смещению спектра возникающих мод, что приводит к однородному и резонансному полю в широком диапазоне частот в некотором рабочем объеме РК.



1-средства измерений и управления, 2 - источники сигнала
 3-смеситель, 4- излучающая антенна, 5 - 3-х компонентный зонд,
 6-приемная антенна

Рисунок 1 - Конфигурация установки с РК

Теоретически рабочий объем представляет собой подобный параллелепипед, грани которого отстоят от ближайшей грани РК на четверть длины волны. Это ограничение, к сожалению, не позволяет охватить весь требуемый частотный диапазон испытаний и делает проблематичным применения РК в диапазоне ниже 100 - 500 МГц. Однако, с другой стороны существующие испытательные системы являются по сути многоканальными в том смысле, что полный частотный диапазон испытаний, в частности, применительно к отечественным требованиям - от 2 МГц до 18 ГГц, охватывается несколькими параллельными каналами, каждый из которых содержит отдельные генератор, усилитель мощности и антенну. Таким образом, даже если один из данных частотных каналов может быть заменен более бюджетной испытательной системой, то эффект в целом может быть существенно положительным. В этой связи РК могут быть альтернативой для полеобразующей системы в диапазоне частот от сотен мегагерц до 18 ГГц.

Как испытательное оборудование испытательная система на основе РК подлежит аттестации. Нормативной основой для использования подобных устройств и разработки подходов к их аттестации являются международные стандарты, в частности, в МЭК 61000-4-21 (для общепромышленной продукции), SAE J1113/27 (для продуктов автомобилестроения), MIL 461F (для оборонной продукции), RTCA DO 160 D/E (для авионики), а также некоторые национальные стандарты серии РВ для испытаний отдельных видов продукции. Целью аттестации являлись оценки однородности поля в данном объеме и напряженности создаваемого поля.

В настоящее время РК разрабатываются многими компаниями в сфере создания оборудования для тестирования электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехоустойчивости в частности. При создании данной испытательной установки были выбраны продукты компания TESEQ. Основные заявляемые характеристики РК производства TESEQ представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Основные заявляемые характеристики РК TESEQ

Тип, габариты, м ³	Диапазон, ГГц, объем, м ³	E при 1 Вт, В/м
2XS, 1,5x0,8x1,0	0.8-18, 0,5x0,3x0,5	130-180
XS, 2,7x1,5x1,3	0.5-18, 1,2x1,0x0,8	130-180

РК типа XS TESEQ была включена в состав испытательной системы оценки помехоустойчивости бортовых технических средств. Общий состав установки приведен в табл. 2, внешний вид стойки с радиотехническим оборудованием показан на рис. 2. Кроме указанного ранее оборудования в состав установки включены трехкомпонентный зонд и приемная антенна с анализатором спектра, а также измерители мощности. Это позволило определить калибровочный коэффициент установки, определяющий связь между входной мощностью P и напряженностью поля E в пределах рабочего объема РК. Одновременное использование в качестве приемных устройств трехкомпонентного зонда и приемной антенны позволило выполнять калибровку воздействия в будущем только с помощью приемной антенны.

В ходе аттестации выполнялись следующие операции:

- оценка относительного разброса компонент вектора напряженности (по каждой компоненте и по всем компонентам) в зависимости от частоты в пустой РК;
- оценка калибровочных коэффициентов для пустой РК;
- оценка калибровочных коэффициентов для РК с поглотителем – имитатором объекта испытаний.

Таблица 2 - Состав оборудования

	Наименование	Тип
1	Трехкомпонентный зонд электрического поля	EP-603
2	Генератор сигналов	SMB100A Опция B120
3	Направленный ответвитель	DC 3010A
4	Направленный ответвитель	DC 7420
5	Измеритель мощности	U2004A
6	Измеритель мощности	U2000B
7	Излучающая антенна	VUSLP
8	Излучающая антенна	BBNA 9120D
9	Приемная антенна	П6-43
10	Приемная антенна	DP3
11	Анализатор спектра	N9010A
12	Согласованные нагрузки	



Рисунок 2 - Внешний вид установки

Выбор такой номенклатуры характеристик обусловлен их универсальностью и независимостью от конкретных моделей генераторов или усилителей мощности, что позволило оценивать создаваемую напряженность поля при любых входных мощностях. Критичный вопрос применения РК связан с влиянием объекта испытаний на характеристики создаваемого поля. Объект испытаний, расположенный в рабочем объеме, изменяет добротность РК и может существенно снизить напряженность поля. Для наихудшей ситуации проводится оценка калибровочных коэффициентов РК с расположенным с рабочем объеме радиопоглощающим материалом. Сравнение калибровочных коэффициентов пустой РК и РК с нагрузкой позволило оценить качество РК. Для некачественных РК со слабым резонирующим эффектом различие в данных коэффициентах было бы незначительным.

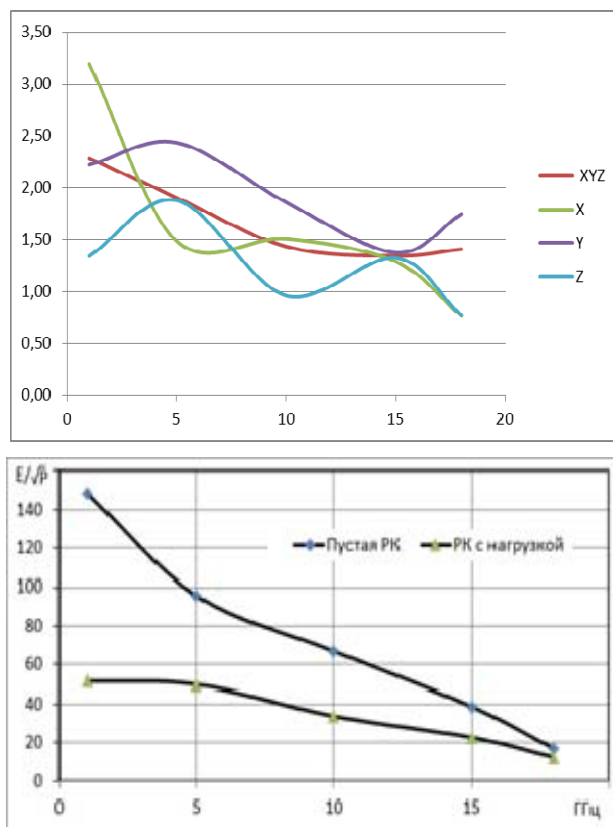


Рисунок 3 - Частотная зависимость однородности поля (дБ от частоты ГГц) (слева) и калибровочных коэффициентов пустой РК и РК с нагрузкой (справа)

Основные результаты аттестации представлены на рис. 3. Измерения однородности поля показали, что относительный разброс компонент и модуля напряженности поля не превысили регламентированных 4 дБ по рабочему частотному диапазону. Относительно калибровочных коэффициентов можно сказать следующее. При входной мощности 1 Вт внутри РК создается электромагнитное поле напряженностью от 100 до 140 В/м в диапазоне от 1 до 5 ГГц и от 20 до 100 В/м в диапазоне от 5 до 18 ГГц в пустой РК. Внесение объекта испытаний может снижать создаваемое поле не более, чем в 2-3 раза. Это означает, что применительно к испытаниям объектом морской техники общего применения с требуемой напряженностью поля до 18 В/м можно обойтись без усилителей мощности в диапазоне от 0.5 до 6 ГГц, а для испытаний объектов специального назначения достаточно от 10 до 20 Вт входной мощности в диапазоне до 18 ГГц.

Выводы

Результаты исследований и аттестации испытательной установки оценки помехоустойчивости на основе РК показали следующее:

- возможность создания требуемых высоких уровней воздействия при относительно небольших входных уровнях мощности для испытаний морской продукции как общего, так и специального назначения;
- высокую однородность создаваемого поля, что также позволит снизить требуемую входную мощность.
- оперативность и экономию трудозатрат при испытаниях в диапазоне от 0.5 до 18 ГГц;
- отсутствие необходимости вращения объекта при испытаниях и некритичность его положения относительно направления облучения.

Литература

1. РД 31.64.26-00 Нормы и правила обеспечения ЭМС на морских подвижных объектах и методы комплексной оценки ЭМС.
2. ГОСТ Р МЭК 60945-2007. Морское навигационное оборудование и средства радиосвязи. Общие требования. Методы испытаний и требуемые результаты испытаний.
3. ГОСТ Р 52691-2006. Совместимость техническая средств электромагнитная. Оборудование и системы морской навигации и радиосвязи. Требования и методы испытаний.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ ИМИТАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ АКВАТОРИИ

В. А. Грановский¹, В. В. Беляева², А. В. Шафранюк³, В. В. Прокопович⁴

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ, (812) 499-83-18, e-mail: office@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: моделирование, распределенная система, подводное наблюдение, метрологическая оценка

Работа посвящена аспектам метрологической аттестации программно-аппаратного комплекса моделирования распределенной системы освещения акватории.

Введение

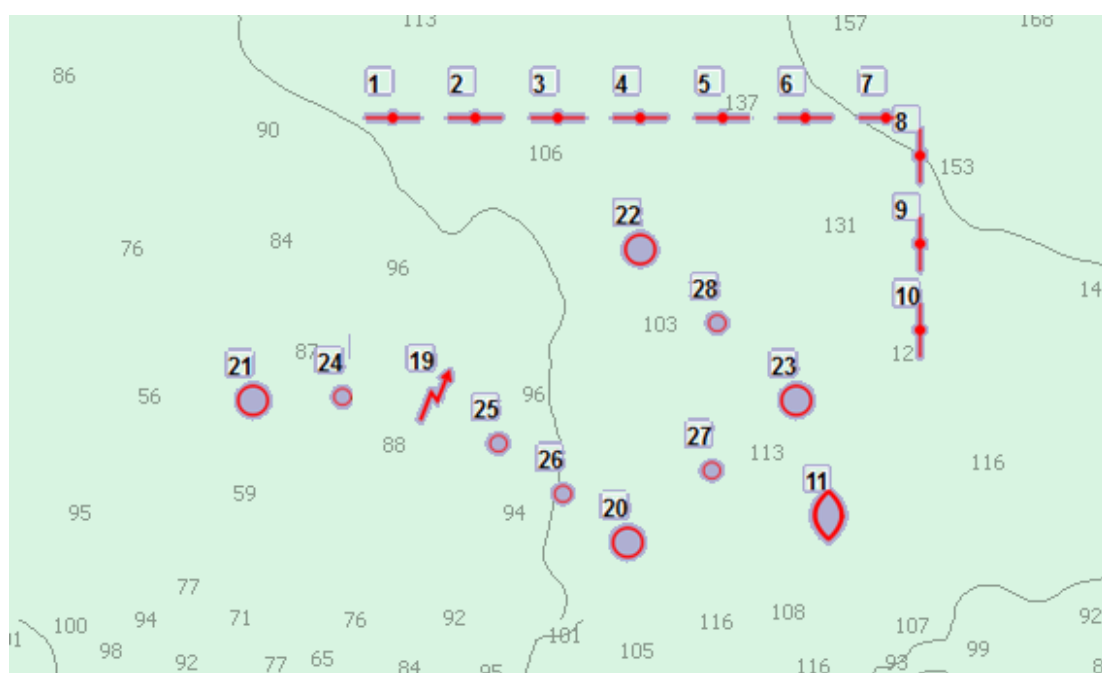
Метрологическая аттестация программно-аппаратных комплексов (ПАК) представляет собой особо выделенную задачу, в связи с отсутствием нормативной базы, четко регламентирующей подобную процедуру для программируемых комплексов. Доклад посвящён опыту метрологической аттестации, разработанного в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ПАК для распределенной системы освещения акватории (РСОА):

- контроль рыболовства;
- контроль судоходного трафика;
- борьба с браконьерами;
- защита нефтяных вышек, путепроводов и т.д.

Распределенная система освещения акватории

РСОА может состоять из центра управления, стационарных средств наблюдения (донные средства наблюдения, автономные гидроакустические станции (АГС)), средств передачи данных (ретрансляторы в случае гидроакустической связи, оптоволоконные линии в случае проводной связи), излучателей и иных средств наблюдения (проходящие мимо корабли).

Пример конфигурации РСОА и расположения ее элементов приведен на рисунке 1.



1-10 – донные средства обнаружения, 11 – центр управления, 19 – излучатель, 20-23 – приемные АГС, 24-28 – ретрансляторы

Рисунок 1 - Пример конфигурации РСОА и расположения ее элементов

¹ Доктор технических наук, главный научный сотрудник.

² Инженер 1 категории.

³ Кандидат технических наук, начальник группы.

⁴ Инженер 2 категории.

Применение ПАК позволяет проводить полный цикл работ по разработке и сопровождению сетевидной системы. Для использования ПАК необходимо проведение его метрологической аттестации, в задачи которой входит подтверждение адекватности получаемых модельных данных.

Описание модели РСОА

Общая модель представлена в виде набора взаимосвязанных частных моделей, связанных между собой отношениями. Общий вид модели приведён на рисунке 2.

Общая модель РСОА и её окружения разбита на следующие, связанные между собой модели:

1. модель объекта, которая описывает его основные свойства:

- общие характеристики: класс, обозначение, наименование и т.п.;
- динамику: массу, геометрические размеры и т.п.;
- включаемые модели;

2. модели гидроакустических приемников и антенной решётки определяют такие характеристики приёмного тракта, как коэффициент концентрации, ширину характеристик направленности и прочее, а модель излучателя определяет тип зондирующего сигнала, мощность и шкалу дальности при его излучении и т.п.;

3. модель волновода, в свою очередь, описывает распространения сигналов, в т. ч. зондирующих сигналов и сигналов звукоподводной связи, их отражения, потери при распространении, многолуче́вость и иное;

4. для вычисления характеристик обмена данными используется модель, которая определяет:

- время распространения сигнала по каналам проводной и звукоподводной связи;
- вероятность доставки данных;
- оптимальный маршрут доставки, с учётом занятости каналов связи;
- определяет порядок обмена данными между моделируемыми устройствами обработки информации;

5. наиболее важной моделью в данном наборе является модель алгоритма функционирования системы, которая связана с иными моделями в рамках одного объекта, а также антенными решётками приёмного тракта и излучателями.

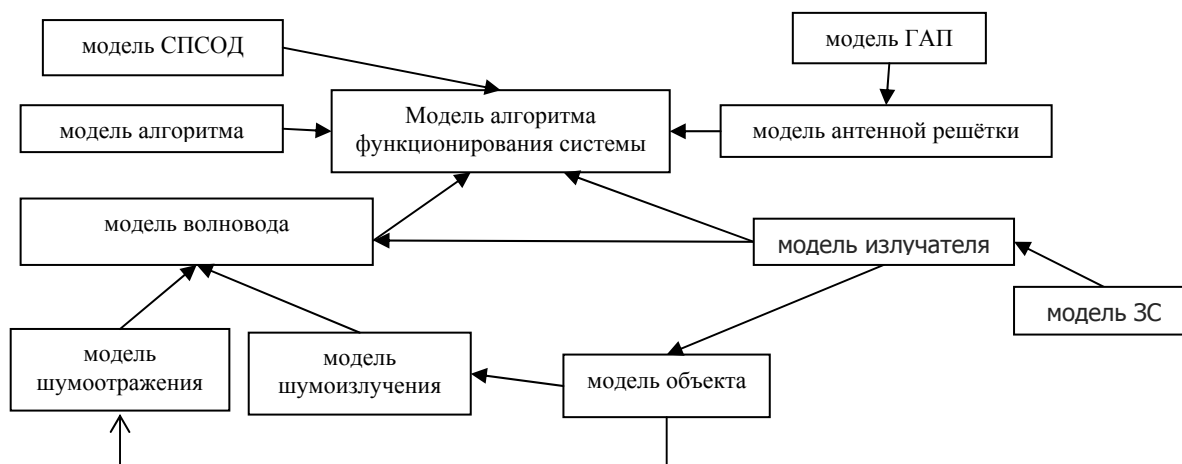


Рисунок 2 - Общая структура модели РСОА

Так как РСОА представляет собой сложную систему, то при проведении аттестации, было предложено разбиение её на несколько моделей:

- модель волновода;
- модель объекта, включающая в себя модели излучающего и приемного трактов и модели алгоритмов функционирования;
- модель системы подводной связи и обмена данными (СПСОД);
- модель системы управления (СУ).

Каждая из моделей содержит в себе определенный набор алгоритмов и программного обеспечения (ПО), реализующего их. ПО, имитирующее работу РСОА, дополняется имитатором тактической обстановки, задающим тактическую обстановку, программой расчета расположения элементов РСОА, вспомогательным ПО отображения необходимых данных и технологическое ПО (статистический анализ).

Рассмотрим особенности метрологической аттестации каждой из моделей.

Модель волновода

Среди существующих способов проверки моделей волновода можно выделить несколько подходов:

ж) Сравнение с натурными данными. Данный способ является наиболее значимым и позволяет установить соответствие гидроакустических расчетов реальным волноводам. При этом собственно сравнение целесообразнее проводить по косвенным расчетным величинам, т. е. сравнивать не непосредственно расчетную передаточную функцию волновода с реальной, а использовать данные о зонах контакта с источником излучения. Это позволит: сделать процедуру верификации более робастной (не чувствительной к случайным фазовым отклонениям), использовать данные, получаемые с антенн, не имеющих вертикального развития, а также полученные для акваторий со сплошной акустической освещенностью и неточно известными параметрами волноводов. К ограничениям использования данного подхода относится необходимость измерения гидрологии, характеристик отражения звука от дна и поверхности, стационарность параметров среды в течение проведения эксперимента и ограничения по глубине волновода и частотам приемной антенны в зависимости от принятого метода расчета (для лучевого подхода диапазон частот более (50 – 200) Гц). Данный подход проверяет как соответствие физической модели реальным условиям, так и корректность её реализации в ПО.

з) Арбитражный. Данный подход позволяет избавиться от необходимости проведения экспериментов, однако проверяется при этом только корректность реализации теоретических положений в ПО. Метод основан на сравнении результатов расчетов нескольких, независимо разрабатываемых программ. При этом вычисляется норма расстояния между результатами расчетов разных программ реализующих модель волновода и усреднённого значения на множестве различных гидроакустических условий. По распределению данной нормы можно судить о степени адекватности ПО реализуемым алгоритмам. При этом установка порогового значения для отбора адекватного ПО выставляется в зависимости от требуемой точности расчетов.

и) С использованием аналитически рассчитываемых моделей. Так же как и предыдущий способ позволяет провести проверку корректности реализации теоретических положений программными средствами. В этом случае производится аналитический расчет передаточной функции волновода и сравнивается с результатами вычислений ПО модели волновода для идентичных параметров.

В Концерне был реализован подход с использованием аналитически рассчитываемых моделей. Он позволил провести теоретические расчеты погрешностей волновода и проверить полученные данные с помощью математического моделирования, а также экспериментальных исследований и арбитражных процедур.

Проверка модели волновода на основе эксперимента

В виду отсутствия подтвержденных экспериментальных данных использовались результаты измерений из доклада [1]. Вертикальное распределение скорости звука (ВРСЗ) измерено экспериментально и показано на рисунке 3.

При проведении эксперимента в качестве источника использовался всенаправленный гидрофон с частотой 11 кГц, который располагался в точках P_1 , P_2 , P_6 на глубине 15 м. Коэффициент пространственного затухания рассчитывался теоретически по формуле Торпа. Приемник находился в течение всего эксперимента в точке P_3 на различных глубинах. Поверхность залива была покрыта льдом со средней толщиной 2,2 м, дно представляет собой гранитную скалу с краплениями песка и гравия. Точных данных по коэффициентам отражения от границ области нет, поэтому использовались табличные данные по ним из источника [2].

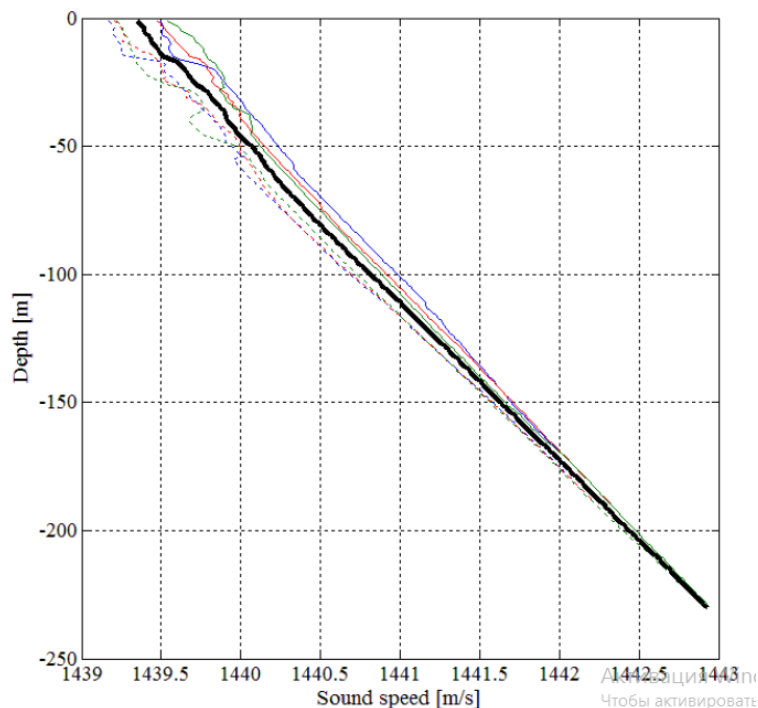


Рисунок 3 - Экспериментально измеренное ВРСЗ в акватории эксперимента

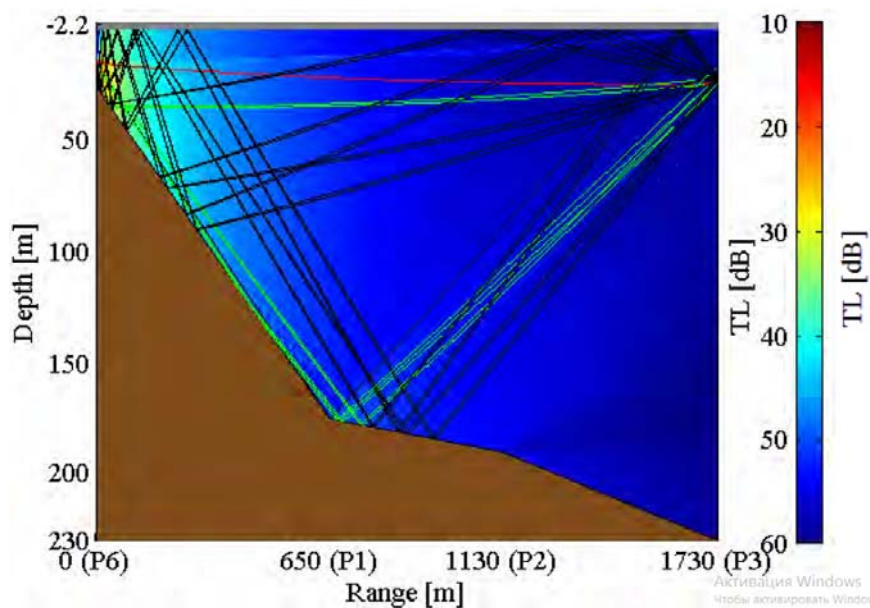


Рисунок 4 - Схематичное изображение профиля дна в акватории эксперимента и рассчитанные потери мощности сигнала при распространении

Результаты расчетов на основе модели волновода показали в среднем отклонение от результатов эксперимента на (3–5)%, что является приемлемым результатом. Таким образом, оцененные теоретически погрешности системы и модели, получили адекватное подтверждение в натуральных условиях.

Проверка программного обеспечения на основе арбитража

Проверка ПО с использованием арбитражного подхода к верификации производится с использованием ПО модели волновода. Данный подход легко распространить на любое количество реперных программ, с которыми производится сравнение. Арбитражный подход в случае двух реперных программ редуцируется для случая рассмотрения разработанного ПО с каждой из двух других независимо разработанных программ и ограничения допустимой величины расхождения в выходных

данных расчётов. Параметры вычисляются для некоторого числа тактических ситуаций расположения источника звука и приёмной антенны. Выбор конкретных ситуаций производится экспертом с учётом следующих моментов:

к) гидрология всех ситуаций должна охватывать её основные виды: мелкое и глубокое (глубина (300 – 500) м), условия сплошной освещённости и наличия дальней зоны акустической освещённости, условия зимы и лета для различных морей;

л) диапазон рассматриваемых частот должен охватывать рабочий диапазон частот большинства современных ГАС освещения подводной и надводной обстановки;

м) соотношения глубин источника и приёмника должны охватывать весь диапазон глубин выбранных акваторий и основные ситуации: нахождения источника и приёмника на одной глубине, выше и ниже друг друга, а также в и во вне подводного звукового канала;

н) дистанция между источником и приёмником должна выбираться в виде сетки в диапазоне от 100 м до дальности действия современных гидроакустических системах в условиях выбранного моря по сильно шумящим источникам (до 50 км).

По результатам расчётов вычисляются невязки каждого из параметров. Решение о положительной верификации ПО принимается при условии, что доля выбросов невязок выше пороговых уровней по всем параметрам и тактическим ситуациям. Вариант проведения арбитражных испытаний и их метрологической оценки предполагается провести в ближайшем будущем. Для этих целей сейчас организован поиск подходящего для данной процедуры программного обеспечения.

Модель системы подводной связи и обмена данными

В основе расчётов параметров передачи данных по звукоподводной связи (ЗПС) лежит библиотека гидроакустических расчётов канала ЗПС.

На рисунке 5 представлена блок-схема работы модели сети. Схема условно разделяет выполняемые в модели вычисления на три группы. В верхней части находится группа вычислений, проводимая на этапе предварительных расчётов. В нижней части блок-схемы представлены два независимо выполняющихся потока. При этом поток №1 отвечает за расчёт параметров пересылки данных, а поток №2 отвечает за коррекцию модели системы подводной связи и обмена данными (СПСОД) при изменении ситуации в ТЭ. Рассмотрим части данной схемы в отдельности.

• На этапе предварительных расчётов модель СПСОД ожидает параметры, получаемые от других компонент ПО. После получения всех необходимых данных производятся предварительные расчёты в следующей последовательности:

• рассчитывается сетка глубин для аппроксимации параметров каналов связи ЗПС и сетка дальностей;

• для всех способов передачи данных: по волоконным линиям и ЗПС в различных режимах вычисляются параметры распространения данных в канале;

• строятся линии связи;

• с использованием множества всех линий связи формируется граф с двунаправленными рёбрами, в котором вершинами графа являются абоненты системы;

• после формирования графа производится расчёт оптимальных путей передачи пакетов в системе.

Вес рёбер устанавливается в зависимости от вероятности доставки 1000 бит информации и времени передачи информации. При этом оптимизация производится по принципу наименьшего суммарного веса по рёбрам передачи данных по алгоритму Дейкстры в результате чего сохраняются полученные маршруты распространения пакетов от каждого из абонентов до всех других (в общем случае некоторые из абонентов могут оказаться недостижимыми). Таким образом, формируется полное описание сети, состоящее из множества линий связи с параметрами для каждой из них и описанием кратчайших путей. После формирования априорного описания сети модель переходит в основное рабочее состояние [3, 4].

В дальнейшем модель работает параллельно в двух потоках. Получение доставленных данных производится путём формирования запросов о выдаче пакетов с указанием имитационного времени, для которого выдача запрашивается. При этом выдаются (и удаляются с хранения) все пакеты, время доставки которых до конечного абонента меньше заданного. Такой запрос формируется при каждом обращении к модели системы, включая передачу данных внутри объекта, что гарантирует высокую точность выдачи данных в соответствии с их имитационным временем доставки.

Таким образом, алгоритм работы СПСОД по сути основан на алгоритме Дейкстры и его аттестация не требуется. ПО, реализующее работу СПСОД, также как и в случае с ПО, реализующим модель волновода, можно аттестовать методом арбитража, в силу большого числа находящихся в открытом доступе программ, реализующих данный алгоритм.

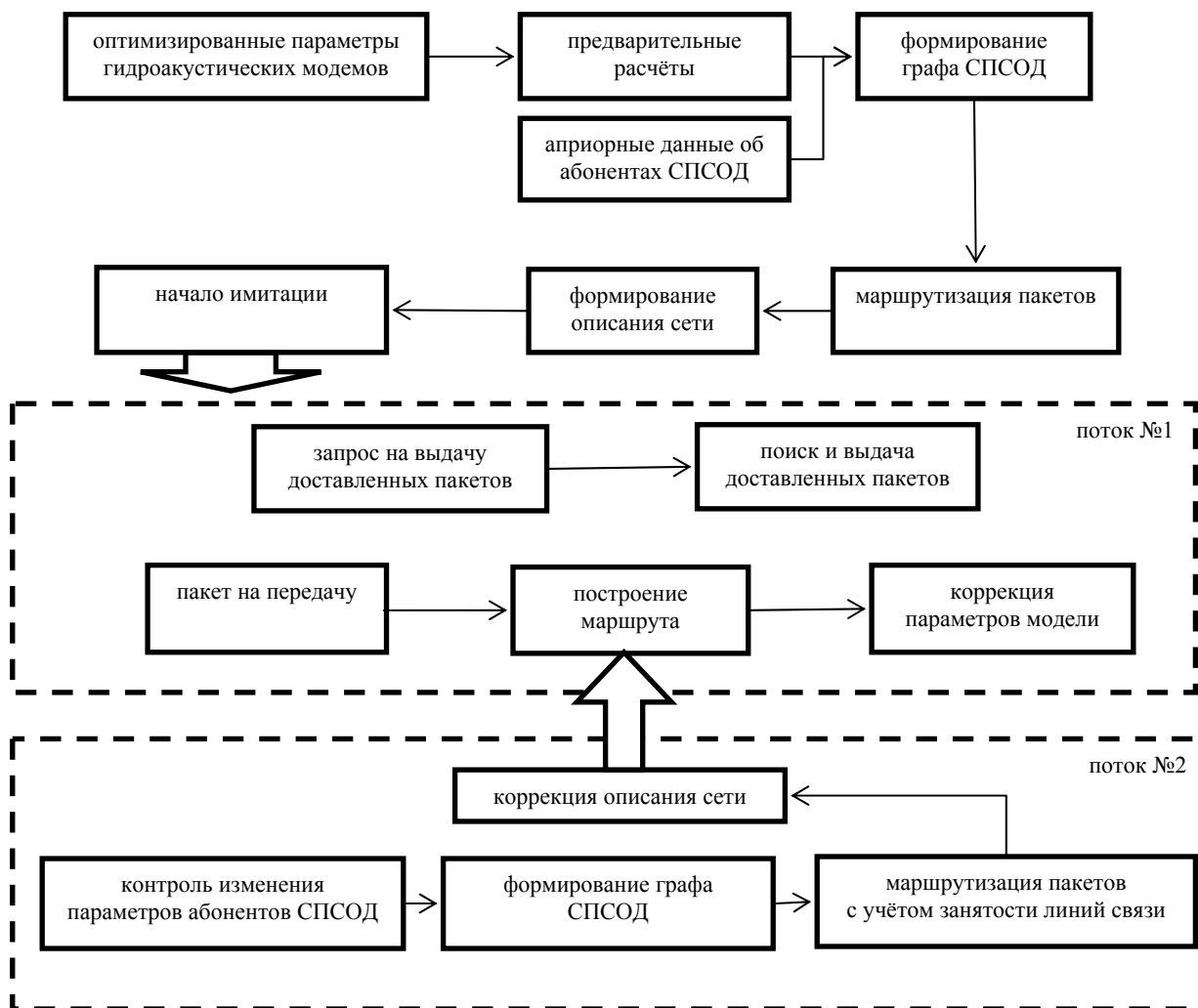


Рисунок 5 - Модель работы сети

Модель системы управления

Разработка СУ является одной из задач, решаемой с помощью программно-аппаратного комплекса, на основе этого можно сделать вывод, что аттестация алгоритмов и ПО СУ является не обязательной.

Модели приемного и излучающего трактов

Модель объекта можно разбить на модели приемного и излучающего тракта и модели алгоритмов функционирования систем. Модели трактов определяют характеристики приёма гидроакустических сигналов антенной решёткой, расположенной на объекте. Модель излучающего тракта характеризуется набором моделей излучателей. Модель излучателя представлена в виде совокупности моделей собственно излучателя (мощности, шкалы дальностей, излучаемые сигналы и программы излучения), а также модели зондирующих сигналов. Таким образом, процесс излучения представляется в виде модели, когда последовательность излучений задаётся набором секторов, где излучение может идти как последовательно, так и параллельно в нескольких секторах. При этом, для произвольной программы излучения выбирается некоторый, из имеющихся на данном излучателе, пакет сигналов, состоящих из набора зондирующих сигналов. Причём расчёт времени начала следующего последовательного (либо набора параллельных) излучений в секторах определяется длительностью пакета сигналов. Кроме того, данные сведения дополняются выбранными значениями шкал дальности и уровня излучения по оси излучателя.

Из описания этих моделей можно сделать вывод, что их проверка и метрологическая оценка невозможна без проверки алгоритмов функционирования (в силу их тесной связи).

Модель алгоритмов функционирования

Алгоритмы имеют два способа задания исходных данных:

- структура с описанием, поступающая на вход алгоритма с периодом обновления данных в реальном времени, устанавливаемом в базе данных;
- структура с данными от других алгоритмов, поступающая по мере их формирования и имеющая различное содержание в зависимости от типа данных.

Выходными данными алгоритмов является структура, содержащая набор целей.

При этом если вероятность обнаружения локального источника меньше реализации равномерно распределённого случайного числа, то цель считается не обнаруженной и происходит переход к следующему источнику. Одновременно, для каждого обнаруженного источника выполняются следующие действия по определению его качественных и количественных параметров. После завершения операции обнаружения цели, определения её параметров и их среднеквадратических отклонений, а также вероятностей отнесения к классам алфавита производится имитация полученной тактической обстановки.

Главная задача модели алгоритмов - обеспечить достаточную адекватность для решения задач программно-аппаратного комплекса. Степень адекватности алгоритмов с метрологической точки зрения, на данный момент возможно оценить лишь экспертным путем, установив предельные значения для выходных параметров.

Заключение

Процедура метрологической аттестации ПАК является сложной задачей, решаемой в несколько этапов, в соответствие со структурой модели комплекса. Модели составных частей комплекса подвергаются метрологическому анализу на предмет установления их адекватности. При проведении подобных процедур необходимо задействовать все возможные способы по определению параметров системы, начиная с экспертной оценки, включая математическое моделирование, и заканчивая практическими испытаниями по подтверждению характеристик и их точности.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00082)*

Литература

1. **Bordone, A., Bozzano, R., Pensieri, S., Picco, P., Schiano, E., Traverso, F., Trucco, A.** Under sea-ice acoustic noise and propagation measurement in Tethys Bay (Ross sea, Antarctica). Underwater acoustic international conference and exhibition 2014.
2. **Урик, Р. Дж.** Основы гидроакустики // - Л.: Судостроение, 1978.
3. **Dijkstra, E. W.** A note on two problems in connection with graphs. // Numerische Mathematik. V. 1 (1959), p. 269-271.
4. **Томас, Х., Кормен, Чарльз, И., Лейзерсон, Рональд, Л., Ривест, Клиффорд, Штайн.** Алгоритмы: построение и анализ = Introduction to Algorithms. - 2-е изд. - М.: "Вильямс", 2006. - с. 1296.



МЕТОДЫ И СРЕДСТВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

НОРМАТИВНЫЕ СЛОЖНОСТИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

А. А. Агдавлетова¹, И. В. Иванова²

Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова, Костанай, Республика Казахстан,
e-mail: ¹aaaislu@mail.ru, ²val_ir_65@mail.ru

Аннотация

Ключевые слова: метрология, система обеспечений единства измерений, закон об обеспечении единства измерений

Сделан анализ и намечены пути гармонизации закона «Об обеспечении единства измерений» Республики Казахстан в рамках международной практики применения единства измерений и Евразийского экономического союза.

Введение

Государственная программа индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015- 2019 годы разработана в соответствии с долгосрочными приоритетами Стратегии «Казахстан-2050». Немаловажную роль в достижении данной программы является сфера метрологии. В связи с интенсивным внедрением новых наукоемких технологий, опережающее развитие измерительных и калибровочных возможностей эталонов становится необходимым требованием. С целью метрологического обеспечения необходимо постоянное улучшение метрологических характеристик государственных эталонов и эталонного оборудования, что способствует надежности, безопасности, выпуску конкурентоспособной продукции и услуг и признания результатов измерений на международном уровне [1]. Сегодня в Казахстане действуют законы «Об обеспечении единства измерений», «О техническом регулировании», «Об аккредитации в области оценки соответствия». Данные документы регламентируют требования, организацию и порядок проведения работ по обеспечению единства измерений, деятельности Казахстанского института метрологии, государственных служб времени и частоты, стандартных образцов и справочных данных, метрологических служб предприятий, сличений эталонов, испытаний, поверки, калибровки средств измерений, метрологической аттестации методик выполнения измерений. В целях ускоренного индустриального развития отраслей экономики и повышения уровня технического оснащения производственных мощностей, в Государственной программе индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015-2019 годы предусмотрен курс на принятие высоких стандартов технического регулирования.

В данной связи, постановлением Правительства Республики Казахстан от 10 июня 2014 года № 635 был утвержден Комплексный план по совершенствованию системы технического регулирования и метрологии до 2020 года. В целях становления независимой системы стандартизации в разделе «Обеспечение метрологической независимости и достижения прослеживаемости измерений» пунктом 43 Комплексного плана предусмотрена Разработка Концепции по внесению изменений в Закон Республики Казахстан «Об обеспечении единства измерений» [2].

Анализ закона «Об обеспечении единства измерений»

«Закон об обеспечении единства измерений» является одним из основополагающих законов метрологической службы Республики Казахстан, был принят 07.06.2000 г., последняя редакция данного закона была произведена в 2012 году. Данный Закон устанавливает правовые, экономические и организационные основы обеспечения единства измерений в Республике Казахстан, регулирует отношения между государственными органами управления, физическими и юридическими лицами в сфере метрологической деятельности и направлен на защиту прав и законных интересов граждан и экономики Республики Казахстан от последствий недостоверных результатов измерений [3].

В связи с изменениями в казахстанской экономике, ориентиром на инновационные технологии, развитием рынка, интеграцией Казахстана в мировое экономическое пространство и созданием Таможенного Союза, осуществлением реформы технического регулирования и аккредитации в области оценки соответствия возникает необходимость совершенствования законодательства в области обеспечения единства измерений. Для обеспечения доверия к измерениям, проводимых в Республике Казахстан, признания метрологических работ, прослеживаемости измерений необходимо соответствовать требованиям международных организаций в сфере метрологии. Для гармонизации

¹ Магистрант.

² Кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения КГУ им. А. Байтурсынова.

с международным опытом возникает необходимость корректировки «Закона об обеспечении единства измерений», стандарта СТ РК 2.1-2009.

Для обеспечения международного признания результатов измерений и сертификатов калибровки необходим ввод понятия: «неопределенность измерений». Данное понятие в СТ РК 2.1-2009 определено как параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине, но в РМГ 29-2013 и в международном словаре основных и общих терминов в метрологии (VIM 3) данное понятие определено как «неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации» [4, 5, 6].

В приложении 10 к договору о Евразийском экономическом союзе введено понятие «референтная методика измерений», данного понятия нет в СТ РК 2.1-2009, оно определено в РМГ 29-2013 и в международном словаре основных и общих терминов в метрологии (VIM 3). Ввод данного понятия в закон «Об обеспечении единства измерений» позволило бы регламентировать работы по утверждению референтных методик выполнения измерений [4, 5, 6, 7].

В рассматриваемом законе определено понятие «эксперт-аудитор в области обеспечения единства измерений» как физическое лицо, аттестованное в порядке, установленном уполномоченным органом по техническому регулированию и метрологии, на право проведения работ в области обеспечения единства измерений. В целях исключения нормы, подразумевающей обязательность получения квалификации технического эксперта на право проведения работ в области обеспечения единства измерений необходима замена этого понятия на: «технический эксперт» в области обеспечения единства измерений – квалификация в области обеспечения единства измерений, присваиваемая физическому лицу путем аттестации в порядке, установленном уполномоченным органом. Данное понятие относится к квалификации персонала в области метрологии, присваиваемой физическому лицу в добровольном порядке, в связи с чем в концепции проекта Закона Республики Казахстан «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Казахстан «Об обеспечении единства измерений» и предлагается отредактировать определение [8].

В приложении 10 к договору о Евразийском экономическом союзе есть ряд понятий и определений, такие как: единица величины, единство измерений, измерение, средство измерений, калибровка, Международная система единиц (СИ), которые отличаются от аналогичных понятий и определений, приведенных в стандарте 2.1-2009 и в «Законо об обеспечении единства измерений», в целях гармонизации их планируется откорректировать.

В связи с введением методик калибровки в число объектов системы обеспечения единства измерений, осуществляемым в целях методического обеспечения работ по калибровке необходим ввод понятия «методика калибровки» [9].

В целях гармонизации с международной практикой, в том числе в рамках ЕАЭС, для обеспечения международного признания результатов измерений, производимых в РК необходимо уточнение понятийного аппарата, позволяющее ввести нормы, которые установят порядок передачи размеров единицы величины от эталонов к средствам измерений в РК, для этого, в рассматриваемый нормативный акт, необходим ввод понятия «передача размеров единицы величины».

В рассматриваемом законе и в СТ РК 2.1-2009 не определено понятие «метрологическая прослеживаемость» [4]. Ввод данного термина необходим для введения в нормативные акты норм, устанавливающих порядок обеспечения прослеживаемости средств измерений и эталонов единиц величин в РК, данное понятие в приложении 10 к договору о Евразийском экономическом союзе определено как: «метрологическая прослеживаемость» - свойство результата измерения, в соответствии с которым результат может быть соотнесен с национальным (первичным) эталоном через документированную неразрывную цепь поверок и калибровок [7].

В рассматриваемом законе и в СТ РК 2.1-2009 не определено понятие «метрологическая экспертиза». Ввод данного термина необходим для введения норм метрологической экспертизы, данное понятие в приложении 10 к договору о Евразийском экономическом союзе определено как: «метрологическая экспертиза» - анализ и оценивание правильности и полноты применения метрологических требований, правил и норм, связанных с единством измерений [4, 7].

Для упорядочивания классификации эталонов, приведение в соответствие с международными требованиями в части прослеживаемости измерений, требованиями ИСО/МЭК 17025 и законодательствами стран ЕАЭС, в целях гармонизации и обеспечения международного признания результатов измерений, производимых в РК необходимо изменение имеющейся статьи в законе, определяющей «Эталон единицы величин»:

- Государственные эталоны единиц величин предназначены для воспроизведения и (или) хранения единиц величин (кратных либо дольных значений единиц величин) и используются с целью передачи их размеров эталонам единиц величин, средствам измерений данных величин на территории Республики

Казахстан [8, 10].

Из числа государственных эталонов решением уполномоченного органа определяются исходные государственные эталоны, которые обеспечивают воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Республике Казахстан точностью. Создание и содержание государственных эталонов единиц величин осуществляется государством. Передача размеров единиц величин осуществляется от государственных эталонов единиц величин путем калибровки эталонов единиц величин, поверки или калибровки средств измерений, а в случае отсутствия в республике государственных эталонов единиц величин – от национальных эталонов единиц величин других государств. Государственные эталоны единиц величин подлежат сличению с эталонами единиц величин Международного бюро мер и весов и национальными эталонами единиц величин других государств. Государственные эталоны единиц величин подлежат регистрации в реестре государственной системы обеспечения единства измерений и калибровке в порядке, установленном уполномоченным органом.

Введение требования по «прослеживаемости измерений», порядка его обеспечения в отношении эталонов, необходимости указания в сертификате калибровки эталона сведений о неопределенности измерений осуществляется в целях приведения в соответствие с действующей международной практикой и требованиями международных и региональных организаций: Международного бюро мер и весов, КООМЕТ, ИЛАК, требованием международного стандарта ИСО/МЭК 17025 [3, 8, 10]. Для обеспечения единства и прослеживаемости измерений, производимых в Казахстане, до международной системы единиц величин (SI), в целях создания условий для международного признания результатов измерений, производимых в РК планируется изменение статьи «Эталоны единиц величин» [5]:

- Эталоны единиц величин предназначены для воспроизведения и (или) хранения единиц величин (кратных либо дольных значений единиц величин) с целью передачи их размеров другим средствам измерений данных величин.
- Эталоны единиц величин применяются метрологическими службами органов государственного управления и юридических лиц.
- Эталоны единиц величин должны быть метрологически прослеживаемы к государственным эталонам Республики Казахстан, а в случае их отсутствия – к национальным эталонам единиц величин других государств. Эталоны единиц величин подлежат калибровке в порядке, установленном уполномоченным органом [8].

Для приведения в соответствие с действующей международной практикой и требованиями международных и региональных организаций: Международного бюро мер и весов, КООМЕТ, ИЛАК, требованием международного стандарта ИСО/МЭК 17025, в целях создания условий для международного признания результатов измерений, производимых в РК, а также для упрощения метрологических процедур в целях создания условий для развития предпринимательства в РК (передача функции установления принадлежности технических средств к средствам измерений пользователям СИ, производства и ремонта СИ – юридическим и физическим лицам, с одновременным исключением функций уполномоченного органа по установлению порядка этих работ) возникает необходимость в изменении статьи «Средства измерений»:

- Средства измерений используются для определения величин, единицы которых допущены в установленном порядке к применению в Республике Казахстан.
- Средства измерений должны обеспечивать метрологическую прослеживаемость результатов измерений к государственным эталонам, а в случае их отсутствия к национальным эталонам единиц величин других государств, а также соответствовать условиям эксплуатации и установленным к ним требованиям.

Производство и ремонт средств измерений осуществляются юридическими и физическими лицами с соблюдением нормативных документов по обеспечению единства измерений. К средствам измерений относятся, в том числе, стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов, измерительные системы. Установление принадлежности технических средств к средствам измерений осуществляют юридические и физические лица, являющиеся их изготовителями, поставщиками или пользователями, в соответствии с настоящим законодательством и нормативными документами по обеспечению единства измерений [8, 9, 10].

В целях определения статуса стандартного образца, широко применяемого в метрологической практике, и порядка его применения в РК, а также для гармонизации в рамках Евразийского экономического союза, для регламентации работ по применению стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, предусмотренных Протоколом о проведении согласованной политики в области обеспечения единства измерений – Приложения 10 к договору о ЕАЭС необходим ввод статьи «Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов» [7, 8]:

- Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов предназначены для воспроизведения, хранения и передачи характеристик состава или свойств веществ (материалов), выраженных в значениях единиц величин, допущенных к применению в Республике Казахстан.

- В сфере распространения государственного метрологического контроля применяются стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов утвержденных типов в порядке, установленном уполномоченным органом.

В целях создания условий для развития калибровки, обеспечения прослеживаемости измерений в соответствии с международными требованиями, через калибровку, а также уточнения порядка калибровки средств измерений в соответствии с международной практикой необходимо изменение имеющейся в законе «Об обеспечении единства измерений» статьи «Калибровка эталонов и средств измерений»:

- 1. Эталоны единиц величин подвергаются калибровке. Средства измерений, не предназначенные для применения при измерениях в сфере государственного метрологического контроля, могут в добровольном порядке подвергаться калибровке или поверке в соответствии со статьей «Поверка средств измерений». Калибровка средств измерений выполняется с использованием эталонов, метрологически прослеживаемых к государственным эталонам единиц величин, в порядке, определяемом изготовителем, владельцем или пользователем этих средств измерений.

Юридические лица, выполняющие калибровку средств измерений, в добровольном порядке должны быть аккредитованы в области оценки соответствия [8].

Результаты калибровки эталонов единиц величин и средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средство измерений, и/или сертификатом о калибровке. В сертификате о калибровке указываются действительные значения метрологических характеристик, метрологическая прослеживаемость измерений, неопределенность измерений и/или заявление о соответствии определенным метрологическим характеристикам. Результаты калибровки средств измерений, выполненной аккредитованными в соответствии с законодательством об аккредитации в области оценки соответствия Республики Казахстан юридическими лицами, могут быть использованы при поверке средств измерений в порядке, установленном уполномоченным органом [9].

В целях обеспечения качественной проработки документов, содержащих требования к измерениям, средствам измерений, особенно в части регламентации деятельности, на которую распространяется государственный метрологический контроль, обеспечение соблюдения требований законодательства и нормативных документов в области обеспечения единства измерений, достоверности результатов измерений в указанных сферах необходим ввод положений по проведению метрологической экспертизы документов, для этого в рассматриваемом нормативном документе необходимо введение статьи «Метрологическая экспертиза»:

а) Содержащиеся в проектах нормативных правовых актов, технических регламентов, стандартов, проектной документации на новые технологические процессы производства в рамках государственных программ и других объектах, установленных законодательством, требования к измерениям, средствам измерений, в том числе стандартным образцам и, измерительным системам подлежат обязательной метрологической экспертизе, которая проводится государственным научным метрологическим центром.

б) Метрологическая экспертиза конструкторской, технологической документации и других объектов может осуществляться в добровольном порядке метрологическими службами органами государственного управления, юридических и физических лиц с соблюдением нормативных правовых актов и нормативных документов по обеспечению единства измерений [8, 9].

Заключение

В данной работе показаны противоречия отдельных статей и определений закона «Об обеспечении единства измерений» и терминов и определений СТ РК 2.1-2009 требованиям действующего законодательства в области единства измерений. Не претендуя на абсолютную полноту и детальность анализа, автором сделаны попытки показать необходимые дополнения и изменения в законе и в стандарте.

Предлагаемые изменения и дополнения направлены на создание благоприятных условий для развития конкурентоспособности бизнеса, с учетом вхождения Казахстана в ВТО, ЕАЭС, необходимости завоевания доверия к результатам измерений и метрологической инфраструктуре

Казахстана со стороны зарубежных партнеров, повышение эффективности государственного управления в достижении целей обеспечения единства измерений, обеспечение международного признания результатов измерений.

Литература

1. Указ Президента РК «Об утверждении Государственной программа индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015 – 2019 годы» от 1 августа 2014 года № 874.
2. Постановление Правительства РК «Об утверждении Комплексного плана по совершенствованию системы технического регулирования и метрологии до 2020 года» 10 июня 2014 года № 635.
3. Закон Республики Казахстан «Об обеспечении единства измерений» от 7 июня 2000 года № 53-ІІ.
4. СТ РК 2.1-2009 «Термины и определения».
5. РМГ 29-2013 «Термины и определения».
6. ISO/IEC GUIDE 99:2007 «Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины (VIM)».
7. Договор о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 года.
8. Концепция проекта Закона Республики Казахстан «О внесении изменений и дополнений в Закон Республики Казахстан «Об обеспечении единства измерений».
9. Министерство по инвестициям и развитию Республики Казахстан. Комитет технического регулирования и метрологии [Электронный ресурс]. – Правовая база. - Режим доступа: <https://www.memst.kz/> (дата обращения: 18.07.2016).
10. СТ РК ИСО/МЭК 17025-2007 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

МЕСТО КАЛИБРОВКИ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. Г. Чуновкина¹, И. А. Харитонов²

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: A.G.Chunovkina@vniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: калибровка, поверка, метрологическая прослеживаемость, поверочная схема, иерархия калибровок

В проекте Стратегии обеспечения единства измерений предусмотрен существенный рост калибровок по сравнению с числом поверок средств измерений. В статье обсуждаются задачи и трудности широкого применения калибровки эталонов / средств измерений при передаче единиц величин. Статья носит дискуссионный характер, в ней рассматриваются различные сценарии развития калибровки.

Введение

По данным Росстандарта в 2015 году ЦСМ выполнили 25 млн. поверок и 700 тысяч калибровок. Эти цифры достаточно объективно отражают ситуацию с востребованностью этих двух видов работ на рынке метрологических услуг в РФ в настоящее время, которая в свою очередь отражает сложившуюся практику, поддерживаемую действующими законодательными актами, регламентирующими экономические отношения в стране в целом, в том числе, в области метрологии.

В соответствии с 102-ФЗ поверка является единственной формой подтверждения легитимности передачи единиц величин средствами измерений и подтверждения нахождения метрологических характеристик средств измерений в установленных пределах в сфере государственного регулирования в стране. Отраслевыми министерствами сформированы перечни измерений для сферы государственного регулирования, в которые практически попадает большинство видов измерений. Поверка обеспечивается более чем 80 ЦСМ и ведомственными лабораториями, укомплектованными необходимым оборудованием и квалифицированными специалистами. Полностью отработан комплект документов, включая методики поверки, формы свидетельств о поверке и прејскурант услуг. Имеется система сбора данных о выполненных поверках, позволяющая предоставлять потребителям все необходимые данные о поверенных средствах измерений. Существует сложившаяся практика надзора за правильностью применения средств измерений, основанная на признании со стороны контролирующих органов поверенных средств измерений.

Очевидно, что в настоящее время в РФ существует полностью сбалансированная с законодательной, структурной, производственной и информационной сторон система, которая обеспечивает единство измерений в стране путем передачи единиц от национальных эталонов средствам измерений с помощью поверки.

Очевидно также, что для того, чтобы внести изменения в эту систему, например, найти в сфере госрегулирования место для калибровки тех средств измерений, которые в настоящее время подвергаются поверке, необходимо иметь веские основания.

Некоторые аргументы в пользу развития калибровки

а) Система обеспечения единства измерений, существующая в настоящее время в РФ, сложилась во времена СССР, соответствовала условиям промышленного производства и производственным отношениям того государства, в определенной степени соответствует условиям настоящего времени, но не соответствует тенденции развития страны по пути рыночной экономики в будущем.

б) В рыночной экономике, имеющей место в развитых странах, объем государственного регулирования в сфере метрологических услуг ограничен, поэтому поверка составляет незначительный объем по отношению к калибровке. Это связано с тем, что калибровка как форма регламентации передачи единицы через прослеживаемость измерений, является более свободной, более рыночной формой обеспечения единства измерений, чем поверка, жестко регламентированная конструкцией поверочной схемы.

в) В настоящее время РФ все еще находится в состоянии переходного периода в части интеграции своей экономики в мировое экономическое пространство и испытывает на этом пути определенные

¹ Доктор технических наук, руководитель отдела.

² Старший научный сотрудник.

трудности, в том числе, обусловленные недостаточным развитием калибровки в РФ и связанные с адаптацией общепризнанных форм взаимодействия субъектов мирового метрологического сообщества, основанных на использовании калибровки: членство в ILAC, признание протоколов и сертификатов калибровки калибровочных и испытательных лабораторий, участие в межлабораторных сличениях и т.д.

г) Большой объем поверки, сохраняющийся в настоящее время в стране, во многом обусловлен устаревшими нормативами определения сроков проведения поверки, что приводит к нерациональным затратам труда и неоправданным финансовым затратам со стороны производства. В то же время для калибровки не устанавливается периодичность и право выбора даты следующей калибровки предоставляется владельцу СИ, что позволяет снизить объем затрат Потребителя и объем затрат труда поверителей.

д) В настоящее время на рынке средств измерений используется все более сложные измерительные системы, в том числе многофункциональные, метрологическое обеспечение которых не удается адаптировать к рутинной поверке в рамках поверочных схем, и поэтому в настоящее время в РФ действует специальный регламент, который позволяет выполнять калибровку СИ, в рамках которой осуществляется содержательная часть работы, а затем формальную поверку, если СИ относится к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

Таким образом, существуют определенные признаки, показывающие, что в рамках модели развития рыночной экономики в РФ сокращение объема поверки с заменой ее калибровкой в системе обеспечения единства измерений в стране способствовало бы повышению эффективности российской экономики и ее интеграции в мировую экономическую систему.

Развитие калибровки в системе обеспечения единства измерений

Сценарий 1. Сокращение сферы государственного регулирования

Основной принцип, положенный в основу этого сценария, заключается в том, что нецелесообразно пытаться непосредственно интегрировать калибровку в сферу государственного регулирования обеспечения единства измерений путем внесения соответствующих изменений в закон, так как это фактически делает калибровку в формальном смысле равноценной поверке со всеми указанными выше ее недостатками и полностью лишит калибровку ее потенциальных преимуществ.

Реальный путь решения задачи состоит в постепенном ограничении сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений при использовании существующих законодательных возможностей или внесении минимальных изменений в законодательную базу.

Необходимо иметь в виду, что смещение объема метрологических услуг от поверки в сторону калибровки, будет сложным процессом, который затронет не только законодательные и нормативные документы, но и потребует перестройки отношений в сфере производства, сокращения рабочих мест определенного типа, подготовки и переподготовки кадров, изменения объемов финансирования ЦСМ и отраслевых лабораторий и т.д. Поэтому очень важно осуществлять этот процесс постепенно, в виде последовательных шагов, чтобы не нанести ущерб сложившейся системе обеспечения единства измерений, действующей в стране, и воспользоваться появляющимися новыми возможностями.

В рамках действующих законодательных и нормативных документов имеется два инструмента для регулирования соотношения объемов работ поверки и калибровки:

а) сокращение перечня физических величин, указанных в приказах отраслевых министерств, устанавливающих перечни измерений, отнесенных к сфере государственного регулирования;

б) ограничение перечня типов СИ, подлежащих поверке, путем исключения части СИ из Госреестра СИ (исключенные из Реестра СИ автоматически перемещаются в сферу калибровки).

Важно еще раз подчеркнуть, что приведение в действие указанных инструментов не требует кардинальных изменений в законодательстве и может быть выполнено в рамках согласованной политики Росстандарта и отраслевых министерств.

В среднесрочной перспективе на 10 лет цель проекта смещения объема метрологических услуг от поверки в сторону калибровки могла бы состоять в том, чтобы выровнять объемы поверки и калибровки в сфере метрологических услуг и сместить государственное регулирование в наиболее важные для государства области такие как, оборона и безопасность и операции коммерческого учета, общепринятые в сфере государственного регулирования в мировой практике.

Сценарий 2. Разграничение калибровки и поверки, исходя из дальнейшего использования их результатов

Этот сценарий не исключает сокращения сферы государственного регулирования, но основным принципом является разграничение применения калибровки и поверки, исходя из требований к метрологическим характеристикам средства измерения и условий дальнейшего применения калибруемого/поверяемого средства измерений. Задачи калибровки и поверки очень близки, обе являются процедурами передачи единицы величины, целью которых является реализация метрологической прослеживаемости результатов измерений и обеспечение единства измерений. Калибровка ведет к определению индивидуальных метрологических характеристик, в то время как при поверке подтверждаются метрологические характеристики, приписанные типу СИ. Но следует признать, что итогом калибровки часто является заключение о соответствии метрологических характеристик СИ установленным требованиям. Возможно, в данном случае было бы более корректно говорить о выполнении калибровки и проверке соответствия метрологических характеристик установленным требованиям, чтобы сохранить различие в процедурах поверки и калибровки.

Вопрос о том, где востребована калибровка, а где именно поверка является оптимальной остается открытым и нуждается в обсуждении. Как уже было сказано выше, есть задачи, где поверка является «тормозом», но, с другой стороны, повсеместное распространение калибровки привело бы к неоправданным затратам на пересмотр документов и усложнению процедур передачи единиц величин без всякого выигрыша в точности и достоверности выполняемых измерений. В чем-то здесь напрашивается аналогия с попыткой распространить вычисление неопределенности на все измерительные задачи и измерения любого уровня точности. Вычисление неопределенности сопровождает каждое измерение, это, прежде всего, относится к эталонным измерениям и является альтернативой техническим измерениям, которые выполняются по аттестованным методикам с приписанными показателями точности. На сегодняшний день широкое распространение получило вычисление неопределенности именно в задачах калибровки. Индивидуальные характеристики СИ (эталонов) и вычисление на их основе инструментальной неопределенности ориентированы на апостериорное оценивание точности измерения, что характерно для эталонных измерений, в частности, измерений, выполняемых при сличениях национальных эталонов и при калибровке эталонов.

При поверке подтверждаются типовые МХ СИ, которые являются ориентиром при выборе СИ для выполнения измерений, при разработке МВИ. Этот способ выражения точности СИ востребован в технических измерениях (прямых измерениях), для которых характерна априорная оценка точности измерений. Распространение калибровки на подобные СИ не представляется оправданным, поскольку непонятны преимущества калибровки в данных ситуациях.

Таким образом, калибровка востребована по отношению к эталонам, где она позволяет повысить точность передачи единицы величины, а постоянный контроль и исследования стабильности эталона позволяют гарантировать метрологическую исправность эталона при соблюдении условий его содержания и применения. Следует также отметить, что к эталонам применяется процедура аттестации, которая, в частности, является подтверждением соответствия метрологических характеристик эталонов установленным требованиям, содержащихся в поверочных схемах. Однако, следует признать, что невозможно провести разграничение между калибровкой и поверкой исключительно только по отнесению СИ к эталону. В целом, представляется рациональным согласиться с документом МОЗМ D5, в котором калибровке подвергаются эталоны, а для СИ используют поверку и калибровку.

Некоторые первоочередные задачи при расширении области применения калибровки в системе обеспечения единства измерений

Следует отметить, что переход от поверки СИ к их калибровке потребует помимо законодательных изменений, разработки и пересмотра большого количества нормативных документов. Эти документы будут касаться непосредственно проведения калибровки, а также регламентирования способов и процедур подтверждения метрологической исправности СИ и качества проводимых измерений. При разработке подобных документов, в частности, необходимо учитывать следующие аспекты:

а) *Разработка методик калибровки.* Методики калибровки часто разрабатываются на основе методик поверки с добавлением раздела, касающегося обработки результатов измерений и вычисления неопределенности измерения. Однако при калибровке устанавливаются индивидуальные характеристики с целью повышения точности измерений в дальнейшем, что, вообще говоря, ставит вопрос о выборе эталона, планировании измерительного эксперимента и т.д. Различие между методиками поверки и калибровки не сводится только к обработке данных, просто остальным аспектам часто не уделяется достаточно внимания.

б) *Использование результатов калибровки.* Поверка дает однозначный ответ, что данное СИ может использоваться с приписанными метрологическими характеристиками до следующей поверки. Что дают результаты калибровки? Действительно существует вопрос, как использовать результаты калибровки и, прежде всего это относится к результатам калибровки измерительных приборов. Протокол калибровки достаточно часто содержит отклонения от опорных значений в разных точках диапазона измерений и соответствующие неопределенности измерений (этих отклонений). При вычислении инструментальной неопределенности возможны разные сценарии:

- Введение поправок и учет соответствующей составляющей неопределенности,
- Учет отклонений в инструментальной неопределенности,
- Проверка соответствия МХ СИ установленным требованиям, по сути, выполнение поверки по результатам калибровки. В этом случае инструментальная неопределенность вычисляется на основе приписанных метрологических характеристик.

Вопросы использования результатов калибровки, в частности, расчета инструментальной неопределенности должны быть прописаны либо в методике калибровки, либо в методике измерений, но они не должны «выпадать» из рассмотрения.

в) *Изменение сферы ответственности пользователя СИ.* Поверка подразумевает сохранение МХ СИ в течение межповерочного интервала. Результаты калибровки действительны в момент калибровки и вопросы обеспечения метрологической исправности СИ переносятся в сферу ответственности пользователя СИ. В этой связи, особенно актуальными становятся вопросы внутрилабораторного контроля и межлабораторных сличений, направленных на контроль стабильности и правильности результатов измерений, получаемых с помощью данного СИ.

Заключение

В докладе рассмотрены предпосылки для увеличения доли калибровки средств измерений (эталонов) в системе обеспечения единства измерений и проблемы, которые могут возникнуть в связи с этим. Обсуждаются два возможных сценария развития калибровки. Первый сценарий ориентирован на сокращение сферы государственного регулирования в рамках действующего законодательства при соблюдении четкой границы между использованием поверки и калибровки. Его практическая реализация напрямую зависит от возможности сокращения сферы государственного регулирования при сохранении обеспечения единства измерений. Второй сценарий допускает «конкуренцию» калибровки и поверки при обеспечении единства измерений, в том числе и в сфере государственного регулирования, что представляется более гибким и может дать положительный эффект при условии, если при практической реализации этого сценария удастся избежать дублирования работ. Следует также указать на то, что при реализации второго сценария потребуются определенные усилия для того, чтобы законодательно согласовать «добровольный» характер калибровки с «обязательностью» регламента сферы государственного регулирования.

Независимо от реализации того или иного сценария продвижения калибровки, есть конкретные вытекающие из этой цели задачи, которые придется решать в любом случае. Обсуждение и решение некоторых из этих задач, перечисленных в докладе, позволит прояснить возможные пути развития калибровки.

Литература

1. JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM).
2. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015) «Об обеспечении единства измерений».
3. OIML D 1. Elements for a Law on Metrology.
4. OIML G 007. Guide to calibration.
5. РМГ 29-2013. ГСОЕИ. Метрология. Основные термины и определения.
6. OIML D 5 Principles for the establishment of hierarchy schemes for measuring instruments.

КАЛИБРОВКА КАК ФОРМА ПОДТВЕРЖДЕНИЯ СООТВЕТСТВИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЁ ПРИМЕНЕНИЯ

А. С. Кривов¹

Межотраслевой совет по прикладной метрологии и приборостроению, АО «НПФ «Диполь», Москва, РФ,
e-mail: marip@bk.ru

Аннотация

Ключевые слова: калибровка, поверка, единство измерений, подтверждение соответствия, неопределенность результатов

С целью гармонизации процедур метрологической прослеживаемости измерений с требованиями международных документов рассмотрена проблема различий в определениях основных понятий, связанных с калибровкой средств измерений. Предложено по аналогии с большинством зарубежных стран рассматривать калибровку как процедуру подтверждения соответствия средств измерений. Изменения в законодательстве, предусматривающие использование калибровки для областей сферы государственного регулирования, позволят реализовать критерии признания результатов измерений, принятые международными организациями, и применять в метрологической практике единую форму периодического подтверждения соответствия измерительных приборов.

Современное законодательство определяет калибровку средств измерений как совокупность операций, выполняемых в целях определения действительных значений метрологических характеристик средств измерений. На практике цель калибровки связана не только с оценкой метрологических характеристик. В большинстве случаев калибровка выполняет функцию подтверждения соответствия средств измерений вне сферы государственного регулирования, дополняя в системе обеспечения единства измерений поверку, которая является важнейшей формой подтверждения соответствия для сферы государственного регулирования. Широко распространенное проведение калибровки приборов по методикам их поверки до сих пор реализует подход к калибровке в соответствии с отмененным законом РФ 1993 года.

За прошедшие десятилетия в области калибровки изменился применяемый понятийный аппарат, появились новые международные и межгосударственные стандарты требований к порядку проведения работ. Новые документы получили широкое развитие в большинстве зарубежных стран. Существует проблема несоответствия современного законодательства содержанию действующих международных документов по калибровке и её роли в метрологии за рубежом. Одним из важных последствий этой проблемы является применение двух широко распространенных и близких по процедуре форм подтверждения соответствия средств измерений – поверки и калибровки.

В связи с изложенным в докладе рассмотрена возможность применения калибровки средств измерений как формы подтверждения их соответствия на основе подхода к содержанию и порядку проведения работ, который установлен в современных стандартах. Для этого проведен анализ основных определений понятий, связанных с калибровкой, в международных документах, требований международных стандартов к калибровке, практика их применения. Анализ показал, что имеются возможности для учета всех требований международных стандартов и реализации при калибровке процедуры подтверждения соответствия средства измерений. Таким образом, появляются объективные основания для рассмотрения калибровки в качестве основной формы подтверждения соответствия в системе обеспечения единства измерений и замены поверки средств измерений в ряде областей сферы государственного регулирования.

Это означает, что внесение соответствующих изменений в современное метрологическое законодательство, нормативное и методическое обеспечение метрологических работ как в сфере государственного регулирования так и вне её будет гармонизировано с принятым в большинстве государств принципом метрологической прослеживаемости. При этом для всей прикладной метрологии будет единая методическая база подтверждения соответствия, единые критерии компетентности организаций, не будет дублирования форм регулирования и подтверждения компетентности.

Развитие калибровки как основной формы подтверждения соответствия средств измерений открывает дополнительные возможности для совершенствования метрологического обеспечения деятельности предприятий и организаций. В докладе рассмотрены следующие возможности развития прикладной метрологии на базе внедрения калибровки в качестве процедуры подтверждения соответствия:

- синтез системы управления измерений параметров изделий и технологий на предприятиях (менеджмент измерений);

¹ Профессор, Председатель МСПМП

МЕСТО КАЛИБРОВКИ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

А. Г. Чуновкина, И. А. Харитонов

- проверка квалификации испытательных и калибровочных лабораторий (межлабораторные сравнительные испытания);
- реализация процедур подтверждения соответствия приборов в рабочих условиях (на местах эксплуатации);
- калибровка систем и устройств с измерительными функциями, средств контроля и регулирования.

Литература

1. Закон РФ от 27.04.93 N 4871-I «Об обеспечении единства измерений».
2. Федеральный закон № 102-ФЗ от 26.06.2008 г. «Об обеспечении единства измерений».
3. РМГ 29-2013 “ГСИ. Метрология. Основные термины и определения”
4. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр. — СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
5. Совместная BIPM, OIML, ILAC и ISO декларация по метрологической прослеживаемости. 9 ноября 2011 г. - пер с англ. ААЦ «Аналитика»
6. ГОСТ Р ИСО 10012. Системы менеджмента измерений. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию.
7. ГОСТ ИСО 17043. Оценка соответствия. Общие требования к проверкам квалификации.
8. Calibration guide EURAMET/cg/20/v.01. Calibration of Climatic Chambers Requirements for the Accreditation of Calibration Laboratories. June 2010.
9. Международный документ МОЗМ D1 2012 г. (изд. англ). Основные положения для закона по метрологии. Международная организация законодательной метрологии.
10. Keysight Technologies: Z540.3 Compliance – Brochure. 2010.

ОСОБЕННОСТИ АТТЕСТАЦИИ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ В СЛУЧАЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПОГРЕШНОСТИ

В. В. Беляева¹, М. Д. Кудрявцев², Т. Н. Сирая³, Н. Л. Яворовская⁴
АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, РФ, e-mail: vgranovsky@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: методика измерений, аттестация, метрологическая характеристика, погрешность

При аттестации методик измерений, в том числе, сложных и высокоточных, нередко возникают трудности при оценивании погрешностей измерений согласно методике, в том числе, обусловленные широкими диапазонами величин или апостериорным характером оценивания погрешностей по методике.

В настоящем докладе описаны некоторые приемы, которые оказались полезными при проведении аттестации МИ в метрологической службе АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Введение

При разработке и испытаниях навигационных систем и комплексов постоянно расширяется номенклатура контролируемых характеристик и повышаются требования к точности определения характеристик. Это обуславливает необходимость разработки и использования высокоточных нестандартизованных методик измерений (МИ).

В соответствии с требованиями к метрологическому обеспечению создания и испытаний навигационной аппаратуры (которые регламентированы ГОСТ РВ 1.1-96, ГОСТ РВ 8.570-98, ГОСТ РВ 0008-001-2013, ГОСТ РВ 0008-002-2013), используемые МИ должны быть аттестованы согласно ГОСТ Р 8.563-2009 [1].

Значимость аттестации МИ для практики обусловлена тем, что в ходе аттестации устанавливают (или подтверждают) метрологические характеристики (МХ) МИ, и на основе этого пользователю МИ гарантировано, что погрешности результатов измерений, полученных при использовании данной МИ, находятся в известных (указанных в МИ) пределах.

В соответствии с этим, наиболее содержательной задачей при аттестации МИ является априорное оценивание погрешностей (для заданных диапазонов измеряемых величин и областей изменения влияющих величин).

Вместе с тем, на практике нередко встречаются ситуации, когда данные и результаты измерений (а следовательно, и оценки погрешностей измерений) существенно зависят от некоторых параметров; таким образом, единая априорная оценка погрешности по МИ не может быть получена или оказывается слишком грубой и, следовательно, МИ не обеспечивает достоверность при контроле. Кроме того, в ряде случаев необходимая для оценки погрешностей априорная информация (например, о характеристиках случайных составляющих погрешностей) отсутствует, и оценки погрешностей могут быть получены лишь апостериорно - в итоге реализации методики. Перечисленные группы МИ и рассматриваются в настоящем докладе; далее они условно называются параметрическими МИ.

В указанных случаях аттестация МИ вызывает затруднения; в частности, формально ГОСТ Р 8.563 даже не распространяется на последний случай (когда погрешности оцениваются апостериорно). Однако для решения практических задач (например, при испытаниях аппаратуры) необходимо охарактеризовать качество используемых МИ, и потому приходится применять различные эвристические приемы, чтобы было возможно выполнить аттестацию МИ и дать оценки погрешностей.

В настоящем докладе описаны некоторые пути решения описанной проблемы, которые оказались полезны при проведении аттестации МИ в метрологической службе АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». В докладе выделен ряд ситуаций, вызывающих затруднения при аттестации параметрических МИ, и для них приведены примеры возможных решений.

Основные варианты аттестации методик измерений

Наиболее простыми являются случаи, когда МИ предусмотрены для измерений в широких диапазонах – либо измеряемой величины, либо влияющих величин. Предполагается, что общая оценка погрешности (на весь диапазон) не подходит для пользователя.

¹ Инженер 1 категории.

² Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

³ Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

⁴ Начальник группы.

А) При разработке и аттестации МИ, предназначенной для использования в широком диапазоне измеряемой величины, бывает целесообразно выделить несколько характерных для практики поддиапазонов и оценивать погрешности измерений в каждом из них. При этом разбиение должно быть согласовано с целями измерений и обеспечивать реалистические оценки погрешностей (и, следовательно, достоверность контроля) в каждом из поддиапазонов.

В) При разработке и аттестации МИ, предназначенной для использования в широкой области влияющих величин, целесообразно выделить несколько практически значимых подобластей и оценивать погрешности измерений применительно к каждой из них. Реализация этого варианта во многом аналогична первому, однако обычно оказывается более трудоемкой. В этих случаях при оформлении Свидетельства об аттестации методики измерений необходимо также оформить приложение, в котором приводятся метрологические характеристики МИ, например, в форме таблицы 1.

Таблица 1 - Метрологические характеристики Методики измерений (шифр МИ – по реестру)

Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Предел погрешности измерений
X	I_1	Δ_1
	I_2	Δ_2

	I_n	Δ_n

С) В тех случаях, когда оценки погрешностей могут быть получены лишь после реализации методики (апостериорно), может быть целесообразно переопределить характеристики МИ так, чтобы они допускали априорное оценивание.

Например, можно перейти к определению относительных или приведенных погрешностей, для которых априорные оценки нередко можно выразить через параметры измерительного эксперимента.

Д) Близкий к этому вариант заключается в том, что МИ имеет сложную структуру и содержит несколько этапов (или блоков), и в связи с этим получение итоговых оценок погрешностей затруднительно. В этом случае нередко оказывается рациональным разбиение МИ на ряд блоков и последовательная аттестация соответствующих частных МИ.

Далее в докладе приводятся конкретные примеры реализации указанных приемов, которые позволяют получать реалистические оценки погрешностей и выполнять аттестацию МИ, используемых при контроле изделий.

Аттестация методик измерений и аттестация алгоритмов обработки данных

Прежде, чем перейти к конкретным примерам, следует отметить один общий подход, полезный при аттестации МИ, а именно - аттестацию алгоритмов обработки данных [2, 3]. Это тем более рационально, что в рамках параметрических МИ обычно используются достаточно сложные алгоритмы обработки данных, характеристики которых бывают заранее не вполне известны.

Процедура аттестации алгоритма обработки заключается в следующем:

- выделяют основные характеристики алгоритма;
- формируют (унифицированные) типовые модели данных;
- оценивают характеристики алгоритма на указанных типовых моделях.

В качестве основных характеристик алгоритмов чаще всего используют дисперсию $D(x)$ или среднее квадратическое отклонение (СКО) погрешности измерения, и смещение $B(x) = x - B(x)$, а также объединенную характеристику – второй начальный момент

$$M_2(x) = D(x) + B^2(x).$$

Однако в некоторых случаях бывает целесообразно использовать модифицированные характеристики, прежде всего – относительные СКО или вторые моменты.

В качестве типовых моделей данных принимают конкретные модели, характерные для рассматриваемой МИ, что позволяет исследовать свойства алгоритма именно в рамках данной МИ. В [2, 3] такой вид исследования алгоритма в рамках МИ назван конкретной, или метрологической аттестацией алгоритма.

Характеристики алгоритмов оценивают либо аналитическими методами, либо путем статистического моделирования. Первый способ дает асимптотические значения характеристик оценок, второй подход позволяет получать значения характеристик при умеренном объеме данных.

Аттестация алгоритмов наиболее актуальна для достаточно сложных алгоритмов обработки, в частности, алгоритмов при построении градуировочных характеристик средств измерений [4] и при калибровке многогранных призм методом [5]. Во многих случаях при аттестации сложных МИ именно путем аттестации соответствующих алгоритмов удастся получить необходимые для практики априорные оценки погрешностей измерений и выразить их через основные параметры измерительного эксперимента (число наблюдений, число точек в диапазоне, и т.п.). Это иллюстрирует, в частности, приведенный далее пример МИ для высокоточных совокупных измерений углов.

В заключение отметим один полезный частный случай, когда измеряемая величина представляет собой дисперсию или среднее квадратическое отклонение (СКО) некоторой величины (погрешности). Тогда, очевидно, погрешность согласно МИ оценить априорно бывает затруднительно, поскольку собственно СКО и подлежит оцениванию в рамках МИ. Однако в этом случае можно перейти к относительному СКО, которое при условии приближенно известного распределения можно выразить через число наблюдений. В частности, при нормальном распределении получаем [6], что СКО выборочной оценки СКО по выборке объема n приближенно равно:

$$S(S_n) = \sigma(2n)^{-1/2},$$

где σ - СКО исходной выборки.

Следовательно, относительное СКО выборочной оценки

$$S(S_n) / S = (2n)^{-1/2},$$

то есть, относительное СКО зависит только от объема выборки n . Аналогичные соотношения можно получить и для более сложных оценок СКО, и этот прием перехода к относительным характеристикам часто оказывается эффективным при аттестации МИ. В том числе, аналогичный способ можно использовать и в случае совокупных измерений (например, при точных измерениях углов), которые далее описываются в примере 3.

Пример 1. Методика определения погрешности задания угловой скорости

При аттестации высокоточного имитатора движения как испытательного оборудования используется методика определения погрешности задания угловой скорости. Обычно в практике применяется методика с использованием частотомера (например, Pendulum CNT 90), позволяющего определить интервал времени, за который метка на датчике имитатора движения совершает полный оборот. Существует альтернативная методика, которая позволяет оценить погрешность задания скорости за оборот с помощью высокоскоростного автоколлиматора (АК) и зеркала, расположенного в центре вращения стола поворотного устройства. В этом случае необходимо записывать показания АК в файл с частотой, например, 10 кГц, а затем выявить участки реализации, на которых отсчеты по шкале линейно возрастают (убывают), что соответствует прохождению поверхности зеркала через поле зрения АК. Для каждого такого участка следует определить момент времени пересечения указанными отсчетами нулевого уровня, и затем оценить период вращения как разность соседних моментов времени пересечения.

Проблема заключается в том, что для имитатора установлен широкий диапазон угловых скоростей, при этом погрешности задания угловых скоростей и погрешности МИ при их контроле существенно изменяются по диапазону. Поэтому необходимо выделить в диапазоне ряд точек и в них нормировать погрешности МИ.

В ходе проведения аттестации имитатора выделяют, например, следующий ряд угловых скоростей: 0,1; 0,5; 10; 50; 100; 500; 1000; 1500°/с. В этих точках оценивается характеристика - погрешность задания скорости. Этим скоростям соответствуют следующие периоды вращения: 3600; 720; 36; 7,2; 3,6; 0,72; 0,36; 0,24 с. В данном случае основная составляющая погрешности определения характеристики будет обусловлена интервалом дискретизации. Например, при частоте дискретизации 10 кГц погрешность определения интервалов времени будет $\pm 0,0001$ с для всех определяемых периодов. Таким образом, переходя к погрешности определения скорости вращения за оборот, мы получим значения относительной погрешности, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. Относительная погрешность МИ при частоте дискретизации АК 10 кГц

Скорость, %/с	Период вращения, с	Относительная погрешность %
0,1	3600	$0,3 \cdot 10^{-5}$
0,5	720	$1,4 \cdot 10^{-5}$
10	36	$2,8 \cdot 10^{-4}$
50	7,2	$1,4 \cdot 10^{-3}$
100	3,6	$2,8 \cdot 10^{-3}$
500	0,72	$1,3 \cdot 10^{-2}$
1000	0,36	$0,3 \cdot 10^{-2}$
1500	0,24	$0,4 \cdot 10^{-2}$

Следует отметить, что такая высокая частота дискретизации нерациональна на практике ввиду больших объемов получаемых файлов-реализаций и трудностей их дальнейшей обработки. Поэтому подбирается такая частота дискретизации, которая при минимальном размере данных позволяла бы оценить параметр с приемлемой погрешностью. Так, в ряде случаев достаточно принять частоту дискретизации 100 Гц; относительные погрешности определения параметра при такой частоте приведены в таблице 3.

Таблица 3. Относительная погрешность МИ при частоте дискретизации АК 100 Гц

Скорость, %/с	Период вращения, с	Относительная погрешность при частоте дискретизации АК 10 кГц, %
0,1	3600	$0,3 \cdot 10^{-3}$
0,5	720	$1,3 \cdot 10^{-3}$
10	36	$2,8 \cdot 10^{-2}$
50	7,2	0,14
100	3,6	0,28
500	0,72	1,3
1000	0,36	2,7
1500	0,24	4,1

Пример 2. Методика контроля параметров гидроакустического комплекса

Гидроакустические комплексы в последнее время активно развиваются в сторону расширения их функциональных возможностей. Теперь помимо дистанции, курса и пеленга, они позволяют определить и другие, более сложные параметры. Управление этими комплексами, а также все операции по проведению измерений выполняется в автоматическом режиме, в частности, выполняются косвенные измерения и вычисления по соответствующим алгоритмам. В этой ситуации, когда традиционные аналоговые и цифровые приборы заменяются на сложные программно-аппаратные комплексы, возникает проблема аттестации методик измерений и контроля данных комплексов.

Одним из путей решения задачи явилось выделение отдельных измерительных и измерительно-информационных каналов, выявление структуры и зависимости характеристик отдельных блоков. На основе этого возможно определение характеристик блоков, прежде всего, оценка относительных погрешностей. Данный подход был опробован при испытаниях информационно-измерительных комплексов и подтвердил предварительные оценки, полученные как для отдельных каналов, так и для комплекса в целом. Для оценивания суммарных погрешностей необходимо также учитывать функции влияния.

В рамках предложенного структурного подхода реализована возможность проверки алгоритмов на каждом из этапов: при получении входных данных, корреляция входных данных, построение корреляционных функций, классификация полученных данных, объединение и преобразование, косвенные вычисления, адаптация, фильтрация, преобразования Фурье.

Разумеется, учитываются также дополнительные погрешности, которые возникают при проведении натурных испытаний и обусловлены влиянием окружающей среды и иными внешними факторами. Кроме того, есть возможность оценить приборные погрешности в измерительных трактах.

Пример 3 (высокоточные совокупные измерения углов)

Известно [5, 7, 8], что при повышенных требованиях к точности угловых измерений (в том числе, при калибровке рабочих эталонов плоского угла [9]), представляющих собой правильные многогранные

призмы с отражающими боковыми гранями) измерительная процедура представляет собой дифференциальные совокупные измерения. Помимо избыточности, эта процедура характеризуется структуризацией плана измерений (разбиением на серии), внутренним и внешним контролем целостности получаемых данных и их сложной адаптивной обработкой с применением, как правило, метода наименьших квадратов (МНК). Впервые процедура калибровки одновременно двух многогранных призм (с одинаковым числом n боковых граней), включая построение соответствующего оптимального по точности алгоритма обработки данных на основе МНК, была строго изложена в статье Кука [10] для так называемого случая всех комбинаций, известного также как кросс-калибровка.

Описание процедуры калибровки и параметров плана

Опишем кратко процедуру калибровки. Призмы устанавливаются в центр поворотного устройства одна на другую. Каждая из призм содержит равномерную дискретную круговую шкалу полного диапазона от 0 до 360° , имеющую n отметок с угловым шагом $\Delta\varphi = 360^\circ/n$, где каждая отметка соответствует угловому положению в пространстве нормали соответствующей грани призмы. Измеряемыми при калибровке величинами являются малые постоянные отклонения этих отметок от своих номинальных значений, кратных угловому шагу $\Delta\varphi$. Кроме того, оцениванию подлежат малые относительные сдвиги призм друг относительно друга, обусловленные неидеальностью их совмещения при переходе к очередной серии (мешающие параметры). Отсчетным устройством является автоколлиматор (АК), измеряющий малые углы (несколько угловых секунд) между почти совмещенными гранями верхней и нижней призм. Максимальное число серий (способов совмещения призм) равно n . В каждой серии снимают по n отсчетов от каждой пары граней. Таким образом, объем данных составляет $M = n^2$ отсчетов, а количество оцениваемых параметров составляет $m = 2(n - 1) + n = 3n - 2$. Соответственно, избыточность данных (число степеней свободы) составляет $p = M - m = (n - 1)(n - 2)$.

Упомянутый случай всех комбинаций соответствует выполнению максимально возможного числа серий, равного числу граней n призм, где серии отличаются взаимным угловым положением призм. При этом избыточность данных наступает, начиная с 3-й выполненной серии. Для случая выполнения только части серий $r < n$ (начиная с минимально допустимого числа серий $r = 2$) алгоритмы обработки данных, включая оценки точности, получены в [11]. Основные параметры плана неполной процедуры калибровки:

$$M = r \cdot n, \quad m = 2(n - 1) + r, \quad p = (n - 1)(r - 2).$$

Процедура калибровки состоит в выполнении двух или более серий измерений описанных выше, по n измерений в каждой. Каждая последующая серия отличается от предыдущей угловым сдвигом верхней призмы относительно нижней на угол $\Delta\varphi$ таким образом, чтобы грань призмы с номером, равным номеру серии l , находилась против АК при выставке нижней призмы к нему нулевой гранью. Далее нижнюю призму (для ее отличия от верхней) будем называть опорной круговой шкалой (ОКШ).

Деления ОКШ занумерованы от 0 до $n-1$, и неизвестные углы между нулевым и последующими делениями ОКШ обозначены через Φ_j . Искомые погрешности этих углов равны

$$\varphi_j = \Phi_j - j \gamma \quad (j = 1, \dots, n-1),$$

где γ – угловой шаг ОКШ (и призм).

Аналогично обозначим через Ψ_j угол между нормалью к нулевой и j -ой граням призмы. Информация об отклонениях этих углов от номинальных значений $\psi_j = \Psi_j - j \gamma$ ($j = 1, \dots, n-1$) во время измерений не используется. В дальнейшем сравнение полученных оценок углов призмы с известными из аттестата значениями позволяет контролировать достоверность результатов.

Искомые отклонения углов связаны уравнением

$$\psi_{j+1} - \varphi_j - \lambda_l = d_{lj}^{\text{AK}} \quad (l = 0, \dots, s \leq n-1; j = 0, \dots, n-1),$$

где d_{lj}^{AK} – отсчет по АК при j -м наблюдении в l -ой серии;

λ_l – сдвиг номинальной нормали к l -ой грани призмы относительно нуля ОКШ в начале серии (также подлежит оцениванию).

Данная система уравнений является корректной в смысле линейной независимости и разрешима, начиная с двух серий. Начиная с трех серий, имеется избыточность данных с возможностью контролировать случайную погрешность (ее неизвестную дисперсию σ^2). Заметим, что каждая дополнительная серия увеличивает точность результатов измерений. Максимально возможное число серий равно n , когда призма совершит полный оборот относительно шпинделя. Однако на практике может оказаться достаточным выполнение 2–4 серий при условии, что апостериорная оценка точности достигла требуемого уровня.

Общая характеристика обработки данных при оценивании погрешностей

В случае самых простых измерений (одна серия из n поворотов) обработка данных очевидна, а точность оценивают априорно. Последняя определяется погрешностями шкалы АК, неопределенностью поправок к значениям углов призмы и неточностью интерполяции при редукции полного числа делений ОКШ к количеству опорных делений.

Процедура для трех и более серий характеризуется избыточностью данных, их обработка по МНК распадается на следующие этапы.

1) Исходные уравнения измерений (избыточные условные уравнения) в матричной форме

$$Y=AX$$

где $X = \{\varphi_1, \dots, \varphi_{n-1}; \psi_1, \dots, \psi_{n-1}; \lambda_1, \dots, \lambda_s\}$ – вектор искомых величин длины $2(n-1)+s$;

$Y = \|d_{ij}^{AK}\|$ – вектор отсчетов по АК длины ns (s серий по n в каждой серии);

A – матрица измерений с элементами $0, \pm 1$ (коэффициенты вхождения переменных X).

2) Составляют нормальные уравнения умножением слева на транспонированную матрицу A^T

$$A^T Y = A^T A X.$$

3) МНК-оценки искомых параметров X равны

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T Y.$$

4) Точность полученных оценок характеризует матрица их дисперсий и ковариаций

$$D(\hat{X}) = (A^T A)^{-1} \sigma^2.$$

Степень неравноточности полученных оценок определяется через отношение наибольшей дисперсии к наименьшей:

$$K = \sqrt{D_{\max}/D_{\min}},$$

где коэффициенты при дисперсиях D_{\max} , D_{\min} стоят на диагонали матрицы $(A^T A)^{-1}$.

Для неизбыточных измерений (две серии) это отношение равно $K = \sqrt{n/4}$, что составляет $K=2$ при $n=16$. Начиная с трех серий, оценки практически равноточны ($K < 1,2$ при $n=16$). При полном числе серий ($s=n-1$) оценки равноточны для любого n : $K \equiv 1$.

5) Апостериорная оценка дисперсии погрешности через сумму квадратов невязок равна

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{p} (Y - A\hat{X})^T (Y - A\hat{X}),$$

где p – число степеней свободы (степень избыточности).

В нашем случае вектор X состоит из $n-1$ параметров шкалы станда, $n-1$ параметров призмы и s относительных сдвигов нулей шкал (по числу серий). Полное число измерений (размерность вектора Y) равна sn . Таким образом, число степеней свободы равно

$$p = sn - 2(n-1) - s = (n-1)(s-2)$$

и система разрешима, начиная с двух серий ($p=0$). Начиная с трех серий, процедура становится избыточной ($p > 0$) с возможностью апостериорной оценки точности. Имея значение этой оценки, границу погрешности результатов измерений оценивают величиной:

$$\Delta = 2\sqrt{D_{\max} \hat{\sigma}^2}$$

для доверительной вероятности $P=0,95$.

Таким образом, при аттестации описанной МИ, прежде всего, следует определять относительные характеристики D_{\max} , D_{\min} , которые являются элементами матрицы $(A^T A)^{-1}$ и определяются параметрами плана эксперимента.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00801)*

Литература

- ГОСТ Р 8.563-2009 . ГСИ. Методики (методы) измерений
- МИ 2174-91 ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения

3. **Тарбеев, Ю. В., Челпанов, И. Б., Сирая, Т. Н.** Аттестация алгоритмов обработки данных при измерениях // Измерения, контроль, автоматизация. – 1991 – № 3.
4. **T. Siraya**, Certification of algorithms for constructing calibration curves of measuring instruments, *Advances in Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X (vol.10)*, Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, vol. 86, World Scientific, Singapore, 2015, pp 367-374.
5. **Кудрявцев, М. Д.** Анализ и уточнение математической модели эксперимента при аттестации правильных многогранных призм методом калибровки // Физические проблемы точных измерений: Сб. науч. тр. – Л.: НПО "ВНИИМ им. Д. И. Менделеева", 1984, с. 31–36.
6. **Худсон, Д.** Статистика для физиков. – М.: Мир, 1970.
7. **Богуславский, М. Г., Шарова, Е. Е., Федотова, Л. И.** и др. Государственный первичный эталон единицы плоского угла – радиана. // Измерительная техника, 1972, №7, с. 9-10.
8. **Кудрявцев, М. Д.** Применение метода наименьших квадратов для обработки результатов наблюдений при аттестации правильных многогранных призм методом калибровки. // Метрология, №4, 1982, с. 16–22.
9. ГОСТ 8.016-81 ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плоского угла.
10. **Сук А. Н.** "The calibration of circular scales and precision polygons", *Brit. J. appl. Phys.*, oct. 1954, 5, pp. 367-71.
11. **Кудрявцев, М. Д.** Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01+05.11.15 : защищена 29.12.09 : утв. 09.04.10 / Кудрявцев Михаил Дмитриевич. – М., 2010. – 172 с.

ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БУЁВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ

Д. Г. Грязин¹, О. О. Белова²

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, РФ, e-mail: gdg@mt.ifmo.ru

Аннотация

Ключевые слова: волномерный буй, оценка точности измерений, погрешности, эталонирование, стенды

Приводится анализ особенностей метода измерения морского волнения волномерными буйами, анализируется опыт мировых производителей этих приборов в нормировании и метрологическом обеспечении их характеристик. Указывается на сложность эталонирования средств измерения морского волнения. Приводится опыт оценки метрологических характеристик волномерного буя «Шторм», разработанного в ЦНИИ «Электроприбор».

Введение

Безаварийная работа многих морских сооружений зависит от информации о состоянии морского волнения. Эта информация необходима как для принятия оперативных решений, связанных с их безопасностью, так и для прогнозирования развития волнения. Во многих случаях, производители волномерных буюв (ВБ) указывают в спецификациях на свои приборы совокупность характеристик, никак не связанных с максимальной допускаемой погрешностью, неопределённостью или точностью измерения параметров волнения. Подобная практика отчасти объясняется тем, что ВБ используют косвенные методы измерений и измеряют статистические характеристики волнения. Кроме того, метрологическое обеспечение измерений параметров волнения, не только в нашей стране, но и в мире разработано не достаточно [1]. В Российской Федерации в соответствии с п.3 статьи 1 ФЗ-102 [2] эти приборы находятся в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Они могут быть отнесены к устройствам с измерительными функциями. В связи с этим, они, как минимум, должны проходить первичную аттестацию и процедуру периодического подтверждения их метрологических характеристик, например калибровку в порядке, установленном эксплуатационной документацией на прибор. В том случае, если заказчик требует внесение таких приборов в Государственный реестр средств измерений, то они должны проходить метрологическую аттестацию и периодическую поверку. В связи с тем, что процедуры подтверждения метрологических характеристик требуют значительного числа экспериментального оборудования изготовители стремятся нормировать метрологические характеристики только измерительных модулей ВБ.

Особенности измерения морского волнения волномерными буйами

Измерение параметров морского волнения с помощью ВБ имеет множество особенностей. Отметим, что первичным преобразователем ВБ является непосредственно буй. От того, насколько хорошо он отслеживает ординаты вертикальных возвышений и углов волнового склона морских волн, зависит и точность измерения параметров движения буя. Указанные параметры движения измеряются приборным модулем, который, в этом случае, играет роль промежуточного преобразователя.

Следующей особенностью является то, что буй, как любое плавающее тело имеет шесть степеней свободы. На поверхности взволнованного моря он вовлекается в орбитальное движение частиц воды в волне, при этом он совершает угловые, вертикальные и горизонтальные колебания. Кроме того, если он не установлен на якорю, то он имеет дрейф. А если имеется якорная связь, то она оказывает дополнительное влияние на движение буя.

Очевидно, что и модуль измерения параметров движения имеет погрешности. Таким образом, составляющие погрешности измерения параметров волнения ВБ весьма разнообразны. Картину дополняет отсутствие информации о законах распределения этих составляющих погрешностей, поэтому их сложение само по себе является не простой задачей.

Существующие методы и средства калибровки волномерных буюв

Информация о методах контроля метрологических характеристик ВБ как правило не публикуется в связи с тем, что представляет собой коммерческую тайну фирм – производителей. Однако такая фирма как Datawell BV, которая является одним из мировых лидеров в производстве ВБ, её не скрывает.

ВБ Waverider DWR-MkIII и WR-SG компании Datawell BV калибруются на установке [3], позволяющей имитировать вертикальные перемещения ВБ на волнении (рисунок 1), при этом, точность воспроизведения указанных параметров подтверждается с помощью секундомера и рулетки.

¹ Доктор технических наук, начальник отдела.

² Кандидат технических наук, научный сотрудник.

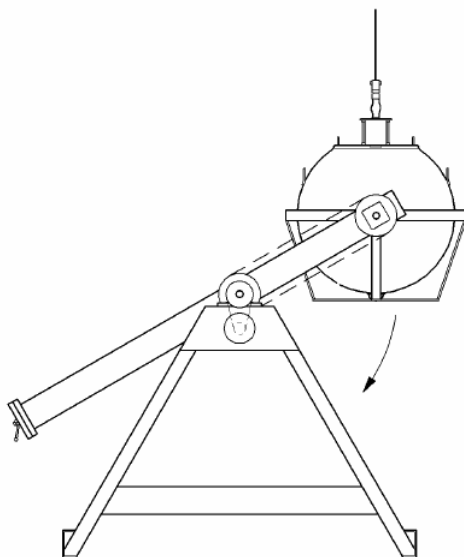


Рисунок 1 - Установка для калибровки буев фирмы Datawell

Китайские метрологи пошли дальше, они создали установку, позволяющую воспроизводить не только вертикальные перемещения ВБ, но и его орбитальное движение [4] (рисунок 2). Установка позволяет имитировать морское волнение в диапазоне высот волн от 1 до 6 м с периодом от 2 до 40 с.



Рисунок 2 - Установка для калибровки волномерных буев, National Center of Ocean Standards And Metrology, Китай

Очевидно, что установка имеет более совершенную конструкцию по сравнению с предыдущей, однако она не воспроизводит углы волнового склона и соответственно не пригодна для калибровки ВБ, измеряющих двухмерной спектр волнения. Для исследования точности воспроизведения углов качки буя, разработчики предлагают дополнительно использовать обычные стенды качки.

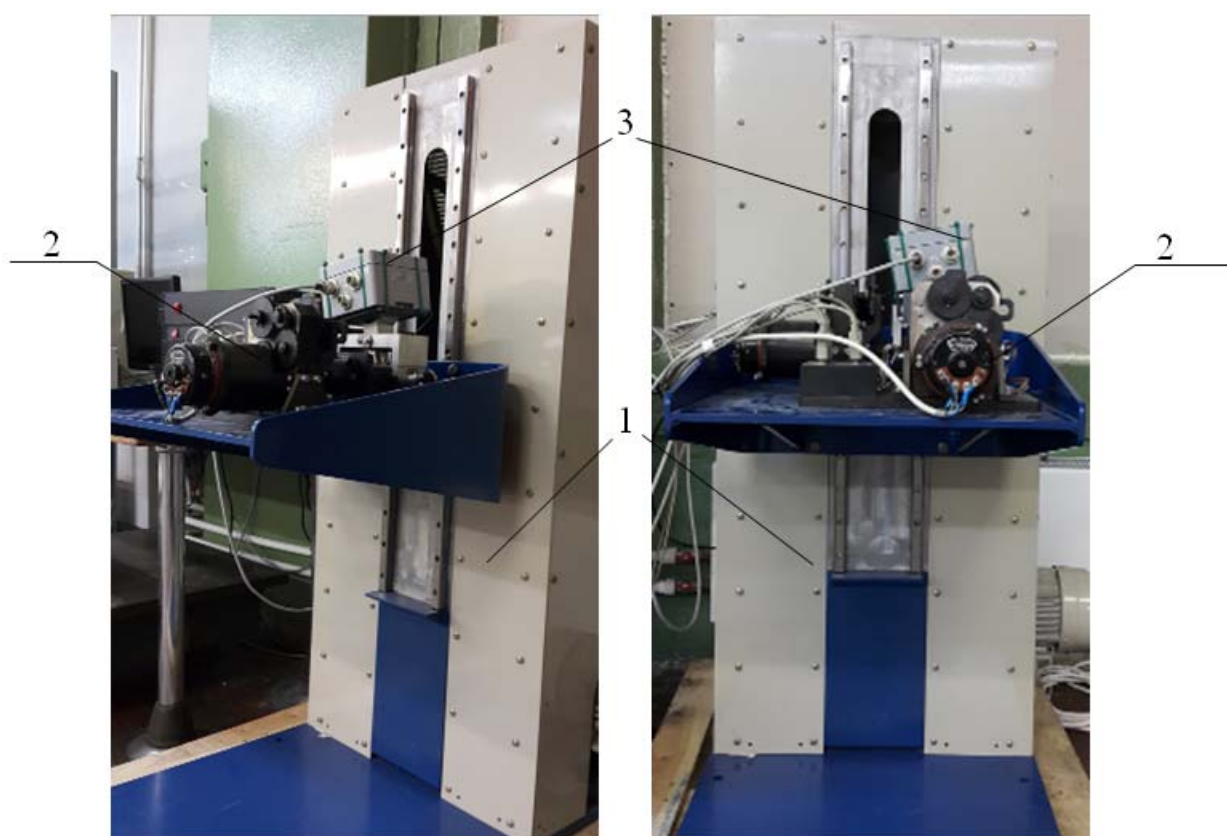
Таким образом, в настоящее время калибровка волномерных буев в режиме их функционирования не производится. Калибровка измерительных модулей производится по отдельным видам воздействий, что требует значительного количества оборудования.

Предлагаемые методы оценки погрешностей ВБ

Предлагаемый подход заключается в разработке специализированных стендов, позволяющих воспроизводить комплексное воздействие, то есть обеспечивать условия испытаний, наиболее близкие к реальному морскому волнению.

В ЦНИИ «Электроприбор» разработана комплексная экспериментальная установка для воспроизведения как вертикальных, так и угловых колебаний (рисунок 3). Установка состоит из малогабаритного двухосного станда качки [5] и станда вертикальных перемещений. Такая компоновка позволяет добиться синхронизированного воспроизведения угловых и вертикальных колебаний, которые имитируют воздействие на измерительный модуль ВБ. Двухосный станд качки обеспечивает воспроизведение угловых колебаний по двум осям с амплитудами 15° и 25° по крену и дифференту соответственно, а станд вертикальных перемещений позволяет имитировать гармоническое (регулярное) волнение высотой 0,45 м. Малые габариты станда качки позволили установить его на подвижной платформе станда вертикальных перемещений. При этом на платформе станда качки закрепляется измерительный модуль ВБ. Общий вид предложенной установки представлен на рисунке 3.

Использование подобной установки позволит воспроизвести воздействие на измерительный модуль, наиболее соответствующее тому, которое имеется в ВБ при его работе. Отметим, что существует метод оценки характеристик датчиков и модулей при воспроизведении колебаний в заданном спектре частот [6], который может быть реализован, в том числе и при помощи указанного двухосного станда качки. Это позволит проводить испытания в условиях реального спектра морского волнения, что повысит достоверность результатов.



1 – станд вертикальных перемещений, 2 – двухосный станд качки,
3 – измерительный модуль ВБ

Рисунок 3 - Общий вид экспериментальной установки

Помимо лабораторных исследований оценка метрологических характеристик измерителей волнения может производиться путем непосредственного сличения результатов их измерений с показаниями эталонного волнографа. В качестве эталонного волнографа зачастую выбирают струнный уровнемер как наиболее простой и точный. Испытания необходимо проводить на специально оборудованных полигонах. В качестве такого полигона может выступать, например, морская платформа экспериментального отделения Морского гидрофизического института, расположенная в пос. Качивели, республика Крым [7]. Платформа установлена в 700 м. от берега на стальных фермах, стоящих на дне акватории глубиной 35 м. При этом струнный волнограф может закрепляться на ферме платформы, пронизываемой волнами, а буй – быть заякорен рядом с ней.

Предлагаемые подходы к оценке метрологических характеристик волномерных буюв позволят воспроизвести условия испытаний, наиболее близких к реальным условиям эксплуатации подобных

приборов. Однако это потребует создания специализированного оборудования и испытательных полигонов, а также организации работ по внесению струнных волнографов в Государственный реестр средств измерений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-08-00308а

Литература

1. **Кочарян, С. А.** Особенности и современное состояние гидрологических измерений / С. А. Кочарян, А. Н. Пронин // Труды конференции «Метрология гидроакустических измерений». – 2013.
2. Российская Федерация. Федеральный закон об обеспечении единства измерений от 26 июня 2008 г. (№102-ФЗ).
3. **P. L. Gerritzen.** The calibration of wave buoys. Datawell BV, Zomerluststraat 4, 2012 LM Haarlem, The Netherlands. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.datawell.nl/Support/Documentation/Publications/datawell_publication_hydrographicinstrumentation-calibrationwavebuoys_oct1993_2004-06-30.pdf, свободный.
4. **Y. U. Jianqing.** How we calibrate the Wave Height and Period Measurements from the Gravitational Acceleration Wave Buoys in RMIC/AP. RMIC for the Asia-Pacific Region National Center of Ocean Standards and Metrology, China. October, 2014.
5. **Пат. 2554631 С2** Российская Федерация, МПК G 01 М 7/06. Стенд для выработки угловых колебаний в двух плоскостях / Грязин Д. Г., Величко (Белова) О. О., Филатов Ю. В., Самохвалов Д. В., Боронахин А. М. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – № 2013119775/28 ; заявл. 22.04.2013 ; опубл. 27.06.2015, Бюл. № 18. – 5 с.: ил.
6. **Грязин, Д. Г.** Оценка характеристик микромеханических датчиков и модулей при их групповом изготовлении. Метод и его техническая реализация / Д. Г. Грязин, О. О. Величко (Белова) // Нано- и микросистемная техника. – 2015. – № 5(178). – С. 37–44.
7. Морской гидрофизический институт [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.mhi.ras.ru>, свободный. – Загл. с экрана.

**УСТАНОВКИ ФГУП «ВНИИФТРИ» ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ГРАДУИРОВКИ
ГИДРОФОНОВ
А. И. Щелкунов¹**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, РФ, e-mail: vniiftri@list.ru

Аннотация

Ключевые слова: градуировка, гидрофон, установка

С целью метрологического обеспечения гидроакустических измерений во ФГУП «ВНИИФТРИ» идет постоянная работа по совершенствованию существующих и созданию новых эталонных установок гидрофизических величин. В данной работе рассматриваются разнообразные установки, разработанные для градуировки гидрофонов в камере малого объема в диапазоне частот от 0,001 до 3150 Гц. Данные установки имеют лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с ранее создаваемыми: более широкую номенклатуру поверяемых гидрофонов, простую конструкцию измерительной камеры, ниже требования к квалификации поверителя, меньшее время подготовительных операций. Использование в таких установках в качестве гидрофона сличения тензометрического преобразователя, который можно калибровать абсолютным методом на статических давлениях, обеспечивая тем самым прослеживаемость к эталону статического давления, позволяет проводить градуировку гидрофонов с неопределенностью, не превышающей 0,3 дБ.

К настоящему времени не только в нашей стране, но и в мире для градуировки гидрофонов на частотах ниже нескольких килогерц широкое распространение получили измерительные установки, реализующие метод сличения в камерах малого объема. Принцип действия таких установок заключается в передаче размера единицы звукового давления в рабочем диапазоне частот градуируемому гидрофону с помощью встроенного в жесткую камеру специального преобразователя – гидрофона сличения с известной чувствительностью. Абсолютная жесткость – основное требование к традиционной конструкции камеры малого объема. Но обеспечить жесткость и герметичность камеры в месте крепления гидрофона достаточно сложно. Для этого применяются наборы специальных уплотнительных прокладок и вкладышей. Многие типы гидрофонов конструктивно имеют резиноподобное покрытие, которое имеет определенные допуски в форме и геометрических размерах, что затрудняет их постановку в камеру. Конструкции посадочных мест гидрофонов и гидроакустических головок индивидуальны и не имеют единого стандарта. Номенклатура градуируемых гидрофонов достаточно широка и постоянно пополняется новыми типами. Это приводит к необходимости применения большого числа различных и достаточно сложных по конструкции уплотнений и прокладок для каждого типоразмера градуируемого гидрофона. Работа по установке гидрофона в камеру весьма трудоёмка, кропотлива и требует при этом высокой квалификации оператора. Довольно часто не удается добиться удовлетворительного результата с первой попытки. Вместе с тем камера в месте уплотнения градуируемого гидрофона не оказывается абсолютно жесткой. Нарушение жесткости камеры особенно сказывается при градуировке на низких частотах. Элементы уплотнения могут сохранять в себе пузырьки воздуха. Все это приводит к распределению звукового давления в камере, которое существенно отличается от теоретического. Возникает необходимость многократной переустановки гидрофона в камере. Погрешность градуировки возрастает.

С целью решения этих проблем в установках, разрабатываемых во ФГУП «ВНИИФТРИ», были применены измерительные камеры нового типа. Проведенный анализ методов градуировки показал, что наилучшим в диапазоне низких частот методом градуировки является метод возбуждения звуковой волны в вертикальной, открытой сверху цилиндрической камере. В ходе реализации схемотехнических решений при разработке рабочего эталона единицы звукового давления основное внимание было уделено снижению погрешности градуировки измерительных гидрофонов. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что наиболее предпочтительной является конструкция, обеспечивающая расположение гидрофона сличения и измерительного гидрофона на одной глубине у дна измерительной камеры.

Корпус измерительной камеры представляет собой толстостенный металлический стакан, внутренняя полость которого заполняется водой. Градуируемый гидрофон и гидрофон сличения устанавливаются в специальной рамке. Затем рамка с гидрофонами погружается в полость камеры. Кабеля градуируемого гидрофона и гидрофона сличения выводятся через горловину камеры, на которую накладываются прокладки из резины, предназначенные для герметизации камеры и предотвращающие

¹ Старший научный сотрудник.

передавливание кабелей. Через эти прокладки к торцу камеры крепится электродинамический излучатель. Камера устанавливается на полу лабораторного помещения на виброизолирующее покрытие.

Установка реализует стандартную процедуру метода сличения. Основные характеристики установки представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Основные характеристики установки

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, Гц	от 1 до 3150
Относительная доверительная (суммарная) погрешность градуировки гидрофонов при доверительной вероятности $P = 0,95$, дБ	1,0

В качестве гидрофонов сличения наибольшее распространение на практике в настоящее время получили пьезоэлектрические гидрофоны. Однако недостатки гидрофонов пьезоэлектрического типа, связанные в частности с их высоким импедансом, вызывают определённые трудности при их использовании в измерительных системах на низких частотах. Высокий входной импеданс измерительных устройств вызывает их повышенную чувствительность к электрическим наводкам, ужесточает требования к качеству изоляционных материалов и требует применения специальных мер по влагозащитности входных цепей в целях минимизации токов утечки. Гидрофон сличения пьезоэлектрического типа имеет существенную неравномерность частотной зависимости чувствительности, что приводит к необходимости его калибровки во всем рабочем диапазоне частот, повышает трудоемкость поверочных операций и приводит к увеличению погрешности измерений. В связи с этим весьма актуальной остается проблема совершенствования преобразователей, используемых в качестве гидрофонов сличения.

Достигнутый в последнее время прогресс в области создания тензометрических датчиков давления позволяет использовать гидрофоны, выполненные на их основе, для измерения как статических давлений, так и давлений, изменяющихся в частотном диапазоне до единиц килогерц. Основу чувствительного элемента таких гидрофонов составляет тензометрический датчик давления. Отличительная особенность тензометрического преобразователя в том, что он является приемником статического давления и, благодаря высокой (десятки килогерц) частоте первого собственного резонанса, чувствительность преобразователя на частотах от 3,15 кГц и ниже не имеет зависимости от частоты [1]. Эта особенность позволяет калибровать тензометрический преобразователь абсолютным методом на статических давлениях, обеспечивая тем самым прослеживаемость к эталону статического давления.

При создании установки Э-2 государственного первичного специального эталона единицы звукового давления в водной среде ГЭТ 55-2011 [2] в качестве гидрофона сличения был применен тензометрический преобразователь. Проведенные экспериментальные исследования показали, что чувствительность гидрофона, построенного на основе тензометрического датчика, не имеет частотной зависимости в диапазоне от 0 до 4 кГц. Это согласуется с паспортными данными датчика. Таким образом, калибровку такого тензометрического гидрофона сличения можно проводить не на всех частотах рабочего диапазона, а на одной, что не скажется на точности измерений с использованием этого гидрофона на других частотах. Так как напряжение на выходе тензометрического датчика пропорционально действующему на него статическому давлению, то проще всего проводить его калибровку абсолютным методом, что существенно уменьшает погрешность калибровки. В установке Э-2 чувствительность тензометрического преобразователя определяют, изменяя высоту столба воды в камере. Для этого камеру заполняют водой так, чтобы уровень воды был выше места расположения тензометрического преобразователя, и измеряют постоянное напряжение U_1 на выходе преобразователя. Высоту столба изменяют погружением в воду тела с точно известным объемом V_0 и измеряют выходное напряжение преобразователя U_2 . Изменение гидростатического давления ΔP рассчитывают по формуле Паскаля:

$$\Delta P = \rho g \frac{V_0}{\pi r^2},$$

где ρ - плотность воды,

g - ускорение свободного падения,

$\frac{V_0}{\pi r^2}$ - изменение высоты столба воды в камере, вызванное погружением в цилиндрическую полость

радиуса r тела объемом V_0 .

Чувствительность тензометрического преобразователя вычисляют по формуле:

$$M_{\text{тп}} = (U_2 - U_1) / \Delta P.$$

Следует отметить, что расположение гидрофона сличения, выполненного на основе тензометрического преобразователя, в боковой стенке измерительной камеры в установке Э-2 позволило применить новую конструкцию рамки для постановки градуируемых гидрофонов. Эта рамка универсальна для всех типоразмеров гидрофонов. Следовательно, ограничение на номенклатуру поверяемых гидрофонов теперь обуславливается только физическими размерами внутренней полости измерительной камеры.

Основные характеристики установки Э-2 представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Основные характеристики установки Э-2

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, Гц	от 0,5 до 2000
Воспроизводимое звуковое давление, Па	0,5 - 1000
СКО	$0,5 \cdot 10^{-2}$
НСП	$2,0 \cdot 10^{-2}$ до 1000 Гц $2,8 \cdot 10^{-2}$ до 2000 Гц

Таким образом, применение новой конструкции измерительной камеры позволило существенно сократить время подготовительных операций, упростить саму процедуру установкой градуируемого гидрофона в камеру и практически сняло конструкционные и технологические ограничения на номенклатуру поверяемых гидрофонов. А использование в качестве гидрофона сличения тензометрического датчика позволило повысить точность проводимых измерений.

В установке Э-1 из состава ГЭТ 55-2011 в диапазоне частот ниже 1 Гц для создания необходимого для проведения градуировки уровня звукового давления вместо электродинамического излучателя используется гидростатический возбудитель (ГМК). Принцип действия ГМК основан на преобразовании вращательного движения вала электродвигателя в колебательное движение подвижного штока ГМК. При вращении вала электродвигателя подвижный шток ГМК совершает колебания вдоль вертикальной оси по гармоническому закону. Вместе с подвижным штоком колеблется закрепленный на нем открытый стакан, заполненный водой. Переменное гидростатическое давление создается в герметичной измерительной камере за счет колебаний уровня свободной поверхности жидкости в стакане, сообщающемся с внутренней полостью камеры через гибкую трубку. Основные характеристики установки Э-1 представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Основные характеристики установки Э-1

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, Гц	от 0,001 до 1
Воспроизводимое звуковое давление, Па	80 - 100
СКО	$0,2 \cdot 10^{-2}$ до 0,63 Гц $1,0 \cdot 10^{-2}$ до 1 Гц
НСП	$1,0 \cdot 10^{-2}$ до 0,63 Гц $1,9 \cdot 10^{-2}$ до 1 Гц

Для исследования чувствительности рабочих измерительных гидрофонов при избыточном гидростатическом давлении во ФГУП «ВНИИФТРИ» создана установка Э-3 из состава ГЭТ 55-2011. В этой установке реализован модифицированный метод взаимности, который основан на применении двух отдельных циклов измерений:

- в первом цикле проводят измерения в камере с исходным объёмом;
- во втором цикле в камеру помещают металлический вкладыш точно известного объёма и повторяют измерения.

При определении чувствительности M рабочего измерительного гидрофона модифицированным методом взаимности используется выражение:

$$M = \sqrt{\frac{A \cdot B}{\Phi_B \cdot B - \Phi_A \cdot A} \cdot \frac{\Phi_A \cdot \Phi_B \cdot V}{C_0} \cdot (\chi_B - \chi_I)},$$

где $A = \frac{U_1 \cdot U_3}{U_2 \cdot U_4}$ – измерения в камере с исходным объёмом;

$B = \frac{U'_1 \cdot U'_3}{U'_2 \cdot U'_4}$ – измерения в камере с вкладышем;

C_0 – ёмкость конденсатора в цепи обратимого преобразователя;

V – объём вкладыша;

U_1 – напряжение на выходе гидрофона при работе излучателя;

U_2 – напряжение на выходе обратимого преобразователя при работе излучателя;

U_3 – напряжение на выходе гидрофона при работе обратимого преобразователя;

U_4 – напряжение на конденсаторе C_0 при работе обратимого преобразователя;

χ_B и χ_I – сжимаемость воды и материала вкладыша;

Φ_A и Φ_B – функции, учитывающие распределение звукового давления в измерительной камере.

Основные характеристики установки Э-3 приведены в таблице 4.

В процессе градуировки рабочих измерительных гидрофонов на установке Э-3 производится автоматический контроль физических параметров в полости измерительной камеры, таких как величина избыточного гидростатического давления и температура воды.

Таблица 4 - Основные характеристики установки Э-3

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, Гц	от 0,5 до 500
Воспроизводимое звуковое давление, Па	20 - 50
Создаваемое в измерительной камере избыточное гидростатическое давление, МПа	0,5 - 50
СКО	$0,7 \cdot 10^{-2}$
НСП	$2,4 \cdot 10^{-2}$

Для исследования зависимости чувствительности гидрофона от температуры во ФГУП «ВНИИФТРИ» существует специальная измерительная установка УГПА-100. Конструктивно она во многом повторяет установку Э-3. Основное отличие заключается в том, что её измерительная камера помещена в термостат. Это позволяет проводить исследование зависимости чувствительности рабочих измерительных гидрофонов не только от давления, но и от температуры. В установке УГПА-100 реализован метод взаимности, однако возможно использование и метода сличения с эталонным гидрофоном 1 разряда. Метод сличения является дополнительным методом и реализуется только для определения чувствительности рабочих измерительных гидрофонов при температурах воды в измерительной камере от 15 до 25 °С. Основные характеристики установки УГПА-100 приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Основные характеристики установки УГПА-100

Наименование характеристики	Значение
Диапазон рабочих частот, Гц	от 0,1 до 1000
Воспроизводимое звуковое давление, Па	10 - 200
Создаваемое в измерительной камере избыточное гидростатическое давление, МПа	0,05 - 63
Рабочий диапазон температур воды в измерительной камере, °С	5 - 35
Относительная доверительная (суммарная) погрешность градуировки гидрофонов при доверительной вероятности $P = 0,95$, дБ	1,0

За последние годы ФГУП «ВНИИФТРИ» создало и передало потребителям десятки разнообразных образцов рабочих эталонов и установок, предназначенных для градуировки измерительных гидрофонов. Эта аппаратура позволяет не только определять частотную зависимость чувствительности гидрофона, но и исследовать влияние на неё таких немаловажных факторов, как температура и избыточное гидростатическое давление. На предприятии идет постоянная работа по совершенствованию существующих и созданию новых эталонных установок гидрофизических величин.

Литература

1. **Щелкунов, А. И.** Использование тензометрического преобразователя в качестве гидрофона сличения при измерении чувствительности гидрофонов в измерительной камере малого объема // Исследования в области физико-технических и радиотехнических измерений. Труды ВНИИФТРИ. - 2005. - Вып. 51 (143). С. 109-113.
2. **Исаев, А. Е., Некрич, С. Ф., Некрич, Г. С., Сильвестров, С. В., Черников, И. В., Щелкунов, А. И.** Модернизированный государственный первичный специальный эталон единицы звукового давления в водной среде // Измерительная техника. - 2010. - №5. С. 5-8.

ПОВЕРОЧНАЯ УСТАНОВКА НА ОСНОВЕ ЭКРАНИРОВАННОЙ МЕРЫ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Д. Д. Гидаспов¹, В. В. Привалов², И. С. Хасиев³

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: i.S.Khasiev@vniim.ru

Аннотация

Ключевые слова: Магнитная индукция, экранированная мера, неоднородность

В докладе изложены материалы по разработке, изготовлению, настройке и исследованию метрологических характеристик меры магнитной индукции, работающей в экранированном пространстве и являющейся основой помехозащищенной поверочной установки для прецизионных магнитометров. Обоснован выбор типа и геометрических размеров меры, изложены особенности конструкции и метод сборки, обеспечивающие уменьшение влияния погрешностей изготовления и сборки меры. Приводятся результаты экспериментального определения неоднородности магнитной индукции в рабочем объеме меры и уровня магнитной индукции, создаваемой мерой в местах расположения внутренних стенок экранирующей оболочки, который удалось уменьшить до значений, не превышающих $10 \div 12$ нТл. Приводятся метрологические характеристики меры, состав поверочной установки, фотография меры в сборе.

Таким образом, показана возможность создания помехозащищенных поверочных установок, обладающих высокой точностью в экранированном пространстве.

В связи с растущей точностью магнитоизмерительных приборов, а также в связи с повышением уровня магнитных помех все более актуальной становится задача по созданию помехозащищенных магнитоизмерительных установок.

Эффективным средством для устранения влияния помех является экранирование, позволяющее в экранированном пространстве обеспечить малый уровень остаточной магнитной индукции и высокую стабильность этого уровня.

Одной из задач, которые должны решаться в экранированном пространстве, является поверка и калибровка прецизионных магнитоизмерительных приборов. Для решения этой задачи необходимо создание средств поверки для работы в экранированном пространстве, в частности, создание мер магнитной индукции.

Кроме обычных требований, предъявляемых к мерам магнитной индукции (малая погрешность воспроизведения магнитной индукции, высокая однородность в рабочем объеме, размеры рабочего объема и удобство доступа к нему), к мерам, работающим в экранированном пространстве, предъявляются специфические требования. Магнитное поле, создаваемое мерой магнитной индукции в окружающем пространстве, должно быть минимизировано у стенок, ограничивающих экранированный объем, чтобы не намагничивать стенки. Обратное магнитное поле стенок, вызванное полем меры, не должно оказывать влияния на воспроизводимое магнитное поле в центре меры.

Обеспечение этих требований возможно только с помощью так называемых "безмоментных" катушек, которые состоят из двух устройств: рабочих катушек, предназначенных для воспроизведения единицы магнитной индукции, и компенсационных катушек, включаемых встречно с рабочими, и компенсирующими магнитное поле рабочих катушек в окружающем меру пространстве.

Мера магнитной индукции должна располагаться в центре экранированного пространства размерами $3,0 \times 2,5 \times 2,3$ м. Рабочий объем меры был задан в виде сферы диаметром 50 мм, неоднородность внутри рабочего объема не должна превышать 0,007 %.

При проектировании меры были рассмотрены катушки разных типов - Гельмгольца и четырехсекционные катушки Баркера и Максвелла [1]. Выяснилось, что для обеспечения необходимой однородности катушки должны иметь достаточно большие габариты. От катушек Гельмгольца пришлось отказаться, а катушки Баркера обеспечивали требуемые параметры, в среднем несколько хуже катушек Максвелла (при одинаковых размерах).

Для катушек Максвелла было рассмотрено несколько вариантов с различными соотношениями размеров и числа витков в секциях рабочих и компенсационных катушек меры. Для каждого варианта определялась неоднородность в рабочем объеме и значения магнитной индукции на расстоянии $1,2 \div 1,5$ м от центра меры [2].

Расчеты показали, что при теоретических размерах обмоток меры, неоднородность для всех вариантов не превышает 0,004 %, а магнитная индукция на расстоянии $1,2 \div 1,5$ м порядка 5-10 нТл (в радиальном направлении больше, чем вдоль оси). Для рассмотрения вариантов были исследованы

¹ Ведущий инженер.

² Старший научный сотрудник.

³ Ведущий инженер.

изменения характеристик меры при отклонении размеров обмоток от теоретических. При изменении размеров одной из восьми обмоток на 1 мм неоднородность в ряде случаев изменялась в $10 \div 20$ раз (для рабочих обмоток в большей степени, чем для компенсационных). Магнитная индукция в области $1,2 \div 1,5$ м от центра изменялась не сильно, оставаясь в пределах $10 \div 12$ нТл.

На основании расчетов был выбран оптимальный вариант для изготовления меры, для которого число витков в секциях рабочей обмотки в 2 раза больше, чем в секциях компенсационной. При этом размеры компенсационных катушек в $\sqrt{2}$ раз превышают размеры рабочих. Диаметр наименьшей секции рабочих катушек 400 мм, а наибольшей секции компенсационных 849 мм, расстояние между крайними секциями 683 мм.

Фотография меры в собранном виде приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 - Фотография меры в собранном виде

При проектировании и изготовлении меры главной задачей было обеспечить минимизации возможных погрешностей изготовления. Мера представляет собой набор из восьми обмоток (секций), центры которых лежат на одной оси. Каждая обмотка размещена на своем диске, соосность которых требуется обеспечить при сборке. Для этого было предложено использовать метод сборки с помощью технологической оправки. Все диски обмоток изготавливались из текстолита с одинаковым внутренним диаметром 320 мм и собирались на жесткой оправке, которая представляет собой трубу из стеклопластика наружным диаметром 320 мм и толщиной стенок 8 мм. Диски на оправке собирались по скользящей посадке, что обеспечивало соосность обмоток.

В продольном направлении необходимые расстояния между секциями обеспечивались с помощью прецизионных алюминиевых стяжек. Пазы под обмотки меры привязывались к одной и той же базовой поверхности - внутреннему посадочному диаметру диска.

Собранная на оправке мера прикреплялась к основанию, после чего оправка удалялась.

По окончании сборки меры была проведена проверка взаимного расположения дисков. С помощью трехкомпонентного феррозондового магнитометра производилось измерение углов между осью одной из обмоток, принятой за базовую, и осями остальных обмоток. Измеренные значения углов лежали в пределах от минус $6'$ до плюс $20'$, что можно считать хорошим качеством сборки.

Проверка после сборки меры распределения индукции в рабочем объеме и в окружающем пространстве показала, что несмотря на тщательность сборки меры, требуется некоторая корректировка неоднородности в рабочем объеме. Корректировка производилась путем установки прокладок между стяжками и дисками меры. В результате, при установке прокладок на одном из дисков (в рабочей обмотке), удалось получить необходимый уровень неоднородности.

Также была предусмотрена возможность корректировки неоднородности с помощью дополнительных витков. Для этого в двух симметричных относительно центра меры секциях рабочей обмотки уложены по два корректирующих витка (с возможностью использования одного или обоих). Проверка влияния дополнительных витков на уровень неоднородности при их градиентном включении параллельно рабочей обмотке через регулирующий резистор показала достаточную эффективность метода, особенно в направлении продольной оси.

Уровень магнитной индукции в местах расположения экранирующих стенок ($1,1 \div 1,25$ м от центра меры) хорошо совпадает с теоретическими расчетами и в процессе корректировки неоднородности мало изменялся, оставаясь в пределах 10 нТл.

В процессе работ была произведена разборка и повторная сборка меры. После повторной сборки потребовалась некоторая корректировка неоднородности в рабочем объеме, а уровень магнитной индукции у экранирующих стенок мало изменился.

Изготовленная мера магнитной индукции является мерой 2-го разряда и имеет следующие характеристики:

- диапазон воспроизводимых значений магнитной индукции	$\pm(0,01-100)$ мкТл;
- погрешность воспроизводимых значений магнитной индукции	0,02 %;
- рабочий объем меры - сфера диаметром	0,05 м;
- неоднородность в рабочем объеме	0,007 %;
- постоянная основной обмотки	184 нТл/мА;
- постоянные обмоток компенсации остаточной магнитной индукции	$10,5 \div 18$ нТл/мА;
- габаритные размеры	1010x865x1590 мм;
- расстояние до экранирующих стенок (от центра меры)	$1100 \div 1500$ мм;
- уровень индукции в области $1100 \div 1500$ мм	$2 \div 10$ нТл;
- максимальный потребляемый ток	550 мА.

В поверочную установку на базе экранированной меры магнитной индукции входят также:

- стабилизатор тока для питания основной обмотки;
- стабилизированные источники питания вспомогательных обмоток;
- эталонные сопротивления;
- вольтметр класса не хуже 0,005;
- устройства коммутации и смены полярности.

Средства для установки токов располагаются вне экранированного пространства, на расстоянии 15-20 м от меры. Длина кабеля от меры до источников питания 20 м, кабель подводится к мере по экранированному коридору.

Разработанная экранированная мера магнитной индукции обладает запланированными метрологическими характеристиками и обеспечивает возможность поверки магнитометров с высокой точностью.

Литература

1. **Афанасьев, Ю. В.** Средства измерений параметров магнитного поля/Ю.В. Афанасьев [и др.]. - Л.: "Энергия", Ленингр. отд-ние, 1979. -320 с.
2. **Студенцов, Н. В.** Построение безмоментных мер магнитной индукции с однородным полем/ Н.В. Студенцов, В.Н.Хорев.- Сб. науч. трудов НПО "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева".-Л.:Энергоатомиздат, Лен. отд-е, 1983. -С. 7-13.

ЭТАЛОННЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПРИЁМНИКОВ ВЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Г. С. Некрич¹, А. Н. Матвеев²

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, РФ, e-mail: vniiftri@list.ru

Аннотация

Ключевые слова: градуировка, приёмник колебательной скорости, установка

С целью обеспечения единства векторно-фазовых измерений в гидроакустике во ФГУП ВНИИФТРИ ведутся работы по созданию новых и совершенствованию существующих эталонных установок гидрофизических величин. Векторно-фазовые величины имеют важное значение в сферах как гражданских, так и оборонных приложений. В данной работе рассматриваются установки, разработанные для градуировки приёмников колебательной скорости и градиента давления в камере малого объёма в диапазоне частот от 5 до 1000 Гц и в измерительном бассейне в диапазоне частот от 1000 до 10000 Гц. Установки обеспечивают передачу векторных величин акустического поля современным и перспективным гидроакустическим измерительным комплексам и системам.

Векторные величины гидроакустического поля широко используются в прикладной гидроакустике. За последние десятилетия в США, Великобритании, Германии, КНР, Норвегии и других странах, лидирующих в области подводных акустических технологий, достигнут значительный прогресс, как в векторно-фазовых измерениях, так и в их метрологическом обеспечении, включая создание современных рабочих средств, а также методов и эталонных средств для передачи единиц рабочим средствам измерений. Сегодня в России приёмники векторных величин (далее – ВП) применяют в составе гидроакустических систем ВМФ при решении задач обнаружения подводных объектов и измерения параметров гидроакустического поля корабля. В институтах РАН активно ведутся работы по созданию ВП нового поколения. В рамках ФЦП «Развитие оборонно-промышленного комплекса» выполняются работы по созданию современных ВП и измерительных систем с их использованием в диапазоне частот от единиц герц до 10 кГц. Прорывные успехи в гидроакустических технологиях обеспечили возможность многократно продлить частотный диапазон применения ВП в сторону высоких частот. Расширение рабочего частотного диапазона в свою очередь потребовало разработки новых методов и эталонных средств для градуировки ВП.

В рамках мероприятия по разработке средств калибровки ВП в диапазоне частот (5 – 10000) Гц в 2013 г. был выполнен анализ существующих методов измерений векторных параметров акустического поля. В результате признано целесообразным исполнить эталон в виде двух установок, каждая из которых должна выполнять функции эталона в своём частотном диапазоне, реализуя независимый метод измерений. Работы по созданию низкочастотной эталонной установки, реализующей метод колеблющегося столба жидкости в частотном диапазоне от 5 до 1000 Гц, проводились в 2014 г.

Эталонная высокочастотная установка, работающая в диапазоне от 1 до 10 кГц, основана на методе измерения по полю в незаглушенном гидроакустическом бассейне с использованием стандартной процедуры взаимности [1]. Условия свободного поля реализованы тонально-импульсным методом (при излучении квадратурно дополненных тональных сигналов) и методом скользящего комплексного взвешенного усреднения (далее – СКВУ) при излучении сигналов с линейной частотной модуляцией (далее – ЛЧМ сигнал) [2, 3].

Внешний вид низкочастотной установки представлен на рисунке 1.

Установка состоит из камеры измерительной (ИК), устройства входного (УВ), усилителя мощности (УМ) и информационно-управляющей системы (ИУС). Структурная схема низкочастотной установки представлена на рисунке 2. Основные характеристики низкочастотной установки представлены в таблице 1.

¹ Научный сотрудник.

² Кандидат технических наук.



Рисунок 1 - Внешний вид низкочастотной установки

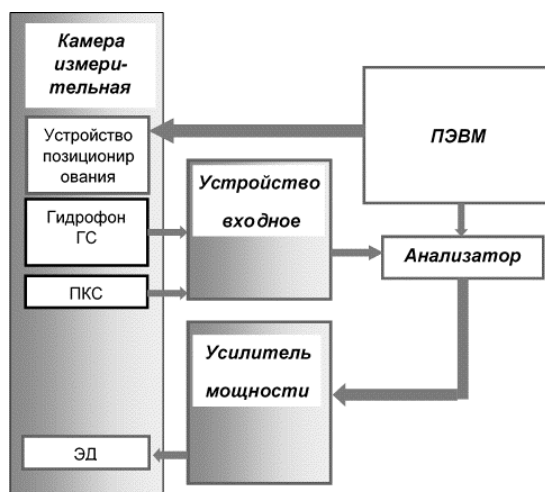


Рисунок 2 - Структурная схема низкочастотной установки

Таблица 1 - Основные характеристики низкочастотной установки

Наименование характеристики	Значение
Диапазон воспроизведения колебательной скорости, м/с	от 10^{-4} до 10^{-5}
Диапазон рабочих частот, Гц	от 5 до 1000
Относительная доверительная (суммарная) погрешность калибровки (поверки) гидрофонов при доверительной вероятности $P = 0,95$, дБ, не более	1,5
Продолжительность калибровки одного приёмника, ч, не более	4

Установка реализует стандартную процедуру метода сличения, состоящую в том, что сигнал векторного приёмника сравнивается с сигналом гидрофона сравнения (ГС). Затем с помощью пересчёта вычисляется значение чувствительности ПКС - $M_{\text{ПКС}}$, мкВ·м/Па.

$$M_{\text{ПКС}} = M_{\text{ГС}} \frac{U_{\text{ПКС}} \sin(k \cdot h_{\text{ГС}})}{U_{\text{ГС}} \sin(k \cdot h_{\text{ПКС}})},$$

где $U_{\text{ГС}}$ - напряжение на выходе ГС, мкВ;

$M_{\text{ГС}}$ - чувствительности ГС, мкВ·м/Па;

$h_{\text{ГС}}$ - глубина погружения чувствительного элемента ГС, м;

$h_{\text{ПКС}}$ - глубина погружения центра ПКС, м;

В процессе разработки высокочастотной установки учитывалось, что при измерениях по полю в условиях лабораторного гидроакустического бассейна метод взаимности до сих пор остаётся единственным первичным методом измерений на частотах от 1 до 500 кГц. При этом векторный

приёмник, который можно было бы использовать как аналог обратимого гидрофона, отсутствует. Последнее обстоятельство не позволяет реализовать измерительную процедуру метода взаимности напрямую. Тем не менее, представляется возможным воспроизводить и передавать единицу колебательной скорости абсолютным методом с использованием обратимого преобразователя звукового давления (обратимого гидрофона). В отсутствие достойной альтернативы эта идея была признана целесообразной для создания эталонной установки в частотном диапазоне от 1 до 10 кГц. Для обеспечения условий свободного поля решено применить как метод временной селекции квадратурно дополненных тональных импульсов, так и технику СКВУ частотной зависимости пары излучатель - приёмник при излучении продолжительных ЛЧМ сигналов [4].

Структурная схема высокочастотной установки приведена на рисунке 3.

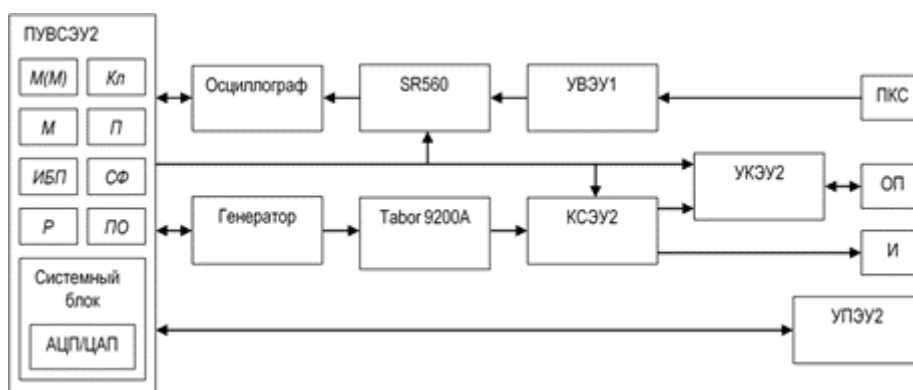


Рисунок 3 - Структурная схема высокочастотной установки

На рисунке 3 приняты следующие обозначения: ПУВСЭУ2 – персональная управляющая ЭВМ, М – монитор, Кл – клавиатура, М(М) – манипулятор-мышь, П – принтер, ИБП – источник бесперебойного питания, СФ – сетевой фильтр, ПО – программное обеспечение, Р – роутер, АЦП/ЦАП – аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователь, SR560 – усилитель, Tabor 9200A – усилитель мощности, УВЭУ1 – устройство входное, КСЭУ2 – коробка соединительная, УКЭУ2 – устройство коммутационное, УПЭУ2 – устройство позиционирования, И – излучатель, ОП – обратимый преобразователь, ПКС – градуируемый приёмник колебательной скорости.

Высокочастотная установка реализует измерительную процедуру градуировки, основанную на использовании метода взаимности. Стандартная измерительная процедура метода взаимности предполагает воспроизведение акустического сигнала излучателем, приём акустического сигнала градуируемым гидрофоном, использование обратимого преобразователя в двух режимах: излучения и приёма акустического сигнала, измерение тока, возбуждающего ОП в режиме излучения акустического сигнала.

Координатно-поворотная система (КПС), внешний вид которой приведён на рисунке 4, смонтирована на подвижном мостовом устройстве гидроакустического бассейна и включает в себя систему позиционирования преобразователей (СПП) и электронные блоки управления.



Рисунок 4 - Внешний вид мостового устройства КПС: 1 – измерительный бассейн; 2 – подвижное мостовое устройство; 3 – перемещаемая платформа; 4 – система позиционирования преобразователей СПП; 5 – стойка управления СУ КПС

Модифицированная процедура метода взаимности основана на определении приведённых выходных напряжений гидрофонов $U_{\text{ОП-Г,сф}}$ и $U_{\text{И-Г,сф}}$ при излучении ОП и излучателем соответственно, и приведённого выходного напряжения обратимого преобразователя $U_{\text{И-ОП,сф}}$ при излучении сигнала излучателем [2].

Процедура измерений сводится к двум операциям:

- определению отношения приведённых выходных напряжений $U_{\text{И-Г,сф}}$ и $U_{\text{И-ОП,сф}}$;
- определению отношения приведённого выходного напряжения $U_{\text{ОП-Г,сф}}$ к току $I_{\text{ОП}}$, возбуждающему ОП.

В результате, чувствительность M_{Γ} на частоте f рассчитывается по формуле:

$$M_{\Gamma} = \sqrt{J_{\text{сф}} \cdot \left(\frac{U_{\text{И-Г,сф}}}{U_{\text{И-ОП,сф}}} \right) \cdot \left(\frac{U_{\text{ОП-Г,сф}}}{I_{\text{ОП}}} \right)},$$

где $I_{\text{ОП}}$, $U_{\text{ОП-Г,сф}}$, $U_{\text{И-ОП,сф}}$, $U_{\text{И-Г,сф}}$ – значения тока и напряжений, приведённые ко входу приёмного тракта.

В результате разработки эталонных установок для калибровки приёмников векторных величин акустического поля в водной среде удалось достичь следующих метрологических характеристик:

- диапазон частот: (5 – 10000) Гц;
- воспроизведение колебательной скорости: от 10^{-4} до 10^{-5} м/с (в зависимости от частоты);
- СКО (относительное) воспроизведения единицы колебательной скорости, не более: $2 \cdot 10^{-2}$;
- НСП (относительная) воспроизведения единицы колебательной скорости, не более: $5 \cdot 10^{-2}$;
- НСП (относительная) передачи единицы колебательной скорости, не более: $6 \cdot 10^{-2}$.

Разработанные во ФГУП «ВНИИФТРИ» эталонные установки для калибровки приёмников векторных величин позволяют обеспечить передачу размера единицы градиента давления и колебательной скорости для метрологического обеспечения современных и перспективных подводных измерительных комплексов и систем, а так же обеспечить воспроизведение и передачу единиц векторных величин акустического поля навигационным комплексам и системам, системам подводного наблюдения и целеуказания, системам подводной связи, эхолотам и другим системам используемым при изучении и освоении Мирового океана в интересах экономики и обороны страны.

Литература

1. **Гордиенко, В. А.** Векторно-фазовые методы в акустике / В. А. Гордиенко – М: Физматлит, 2007. – 480 с.
2. **IEC 60565 (2006).** Подводная акустика. Гидрофоны. Калибровка в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 1 МГц; МКС 17.140.50, 2006. – 168 с.
3. **Исаев, А. Е.** Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля / А. Е. Исаев // Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2008. – 369 с.
4. Пат 2 390 968 Российская Федерация, МПК С1. Н04R 29/00. Способ градуировки гидрофона по полю при излучении непрерывного сигнала в измерительном бассейне с отражениями / А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев, С. В. Сильвестров; заявитель и патентообладатель ФГУП "ВНИИФТРИ" - № 2009112020/28; заявл. 02.04.2009 опубл. 27.05.2009, Бюл. № 15.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЕДИНСТВА ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Ю. А. Ломовацкий¹

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, РФ, e-mail: lom_yuruk@mail.ru

Аннотация

Ключевые слова: гидроакустика, скорость звука, калибровка, сличения.

Скорость распространения звуковых колебаний является одним из основных параметров в области натурной и лабораторной гидроакустики, исследованиях веществ и материалов. Широкий парк гидрофизических и гидроакустических средств измерений используется в Российской Федерации в народном хозяйстве и при освоении мирового океана. В качестве термодинамической переменной скорость звука используется в приборах контроля параметров технологических жидкостей в пищевой, нефтехимической, топливно-энергетической промышленности.

1 Обоснование и разработка государственного первичного эталона

Современная аппаратура для измерений скорости звука в море должна иметь высокие метрологические характеристики. Эти характеристики должны сохраняться при эксплуатации аппаратуры в сложных морских условиях. Особенно жёсткие требования по надёжности предъявляются к погружному зонду, в котором размещается самая ответственная часть аппаратуры – измерительный преобразователь скорости звука. Зонд должен функционировать в химически агрессивной морской воде, при значительных перепадах температуры и давления, происходящих в короткие промежутки времени.

Требования к точности находятся в прямой зависимости от назначения информации о скорости звука.

Все использующиеся на практике измерители скорости звука не являются абсолютными по способу получения измеряемой величины и требуют первичной поверки на стадии их промышленного изготовления, как необходимой операции для обеспечения идентичности выпускаемых приборов в заданном допуске погрешностей. Измерители скорости звука должны периодически подвергаться поверке и в процессе эксплуатации. Это связано с тем, что с течением времени наблюдается увеличение систематической погрешности измерений вследствие естественного старения электроэлементов и материалов при длительных циклических воздействиях перепадов температур и давления, а также деформации конструктивных элементов после ударов или сильной вибрации.

Очевидно, что реальная точность измерения абсолютных значений скорости звука в значительной степени зависит также от способа, средств и условий поверки измерителя скорости звука. Известны два способа поверки. При первом способе измеритель поверяется по эталонной жидкости, скорость звука в которой при заданных условиях известна с большой точностью. При втором – сравнением показаний поверяемого прибора с показаниями эталонного измерителя скорости звука при одновременных измерениях в одной и той же ёмкости с жидкостью, скорость звука в которой может быть известна приближенно.

Госстандарт СССР в 80-х годах прошлого столетия начал работы на базе ВНИИФТРИ по созданию эталонной базы в области измерений скорости звука в воде. Итогом этих работ явилось создание Установки высшей точности для воспроизведения единицы скорости звука в жидкостях УВТ 90-А-2007 (УВТ).

На УВТ проведены экспериментальные исследования для уточнения существующих отечественных таблиц ГСССД скорости звука в дистиллированной воде и таблиц ЮНЕСКО для морской воды. В результате во ВНИИФТРИ разработаны и утверждены новые нормативные документы: «ГСССД 190-2000. Вода. Скорость звука при температурах 0...100 °С и давлениях 0,101325...100 МПа» и «ГСССД 202-02. Морская вода. Скорость звука при солёностях 0...40 ‰, температурах 0...40 °С и избыточных давлениях 0...60 МПа». На УВТ успешно выполнен ряд НИР и ОКР, связанных с метрологией скорости звука в жидкостях и поверкой измерителей скорости звука. В 2000 - 2004 годах на УВТ успешно проведены работы по созданию военного эталона ВМФ скорости звука в рамках НИР «Комплекс работ по созданию эталонной базы МО (ВМФ) в области гидроакустики». При утверждении военного эталона единицы скорости звука в морской воде ВЭ-47 на заседании научно-технического комитета по метрологии и измерительной технике Госстандарта России была дана рекомендация о создании государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах.

В 2009 г. проведены исследования методов и средств измерений скорости ультразвука с целью создания государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах (ГПЭ).

В период с 2010 по 2012 годы проведены работы по разработке государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах по договору Федерального агентства по техническому

¹ Научный сотрудник.

регулированию и метрологии, в результате которых был расширен состав и функциональные возможности действующего эталонного комплекса. Усовершенствован канал измерений скорости звука с целью исключения человеческого фактора из процесса измерений.

Кроме имеющихся двух установок для измерений при атмосферном давлении и для измерений при избыточном давлении для малогабаритных средств измерений, в состав созданного ГПЭ введена установка для испытаний и поверки морских зондов и измерителей при избыточном давлении для крупногабаритных средств измерений, что расширит номенклатуру поверяемых приборов.

Потребителями единицы скорости звука в жидких средах, воспроизводимой разработанным ГПЭ, являются:

- Министерство обороны России в составе баз измерительной техники флотов, морских испытательных полигонов, военных научно-исследовательских институтов;
- ведущие академические институты России;
- предприятия, специализирующиеся в судостроении, судоремонте и морском подводном оружии.

Число основных потребителей «продукции» ГПЭ составляет порядка 30 - 40 предприятий и организаций. Основными из них являются:

- ОАО «Концерн «Океанприбор»», г. Санкт-Петербург;
- Главный научный метрологический центр министерства обороны РФ «ГНМЦ», г. Мытищи;
- ОАО «Таганрогский завод «Прибой»;
- ЗАО «Рыбинский судостроительный завод»;
- ОАО «Дальприбор»;
- ФГУП ЦС «Звездочка» и др.

Разработанный Государственный первичный эталон обеспечивает единство и достоверность измерений в области измерений скорости звука в жидких средах в соответствии с законом РФ ФЭ-102 «Об обеспечении единства измерений». Его создание позволило:

- обеспечить воспроизведение и передачу размера единицы навигационным комплексам и системам, системам подводного наблюдения и целеуказания, системам подводной связи, эхолотам и другим системам используемым при изучении и освоении Мирового океана в интересах экономики и обороны страны;

- обеспечить воспроизведение и передачу размера единицы приборам и комплексам медицинской звуковой техники, что позволило улучшить их качественные и количественные характеристики;

- обеспечить метрологическое поддержание систем звукового контроля жидких пищевых продуктов и их ингредиентов;

- создать эталонную базу для испытаний новых типов стандартных образцов, используемых для градуировки, поверки и испытаний нефти, нефтепродуктов, жидких и сжиженных углеводородов;

- обеспечить прослеживаемость к государственным эталонам звуковых расходомеров, уровнемеров, используемых при контроле объёма транспортируемых нефти, нефтепродуктов, жидких и сжиженных углеводородов.

2 Состав и описание государственного первичного эталона

2.1 Общие сведения

Разработанный ГПЭ воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах и передает ее размер в диапазоне от 800 до 2000 м/с.

ГПЭ обеспечивает воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением результата измерений, не превышающим $\pm 0,005$ м/с при 15 независимых измерениях.

Неисключенная систематическая погрешность не превышает $\pm 0,04$ м/с.

Стандартная неопределенность:

- оцененная по типу А 0,005 м/с;

- оцененная по типу В 0,02 м/с.

Суммарная стандартная неопределенность 0,02 м/с.

Расширенная неопределенность 0,04 м/с при $K = 2$.

ГПЭ состоит из трех установок (рисунок 1).

Установка Э-1 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах при атмосферном давлении в диапазоне температур от минус 4 до + 50 °С.

Установка Э-2 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах при избыточном давлении от 0 до 60 МПа в диапазоне температур от + 1 до + 35 °С. Она предназначена для малогабаритных изделий (габариты не более $\varnothing = 90$ мм, $h = 150$ мм).

Установка Э-3 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах избыточном давлении от 0 до 15 МПа в диапазоне температур от + 15 до + 25 °С. Она предназначена для крупногабаритных изделий

(габариты не более $\varnothing = 400$ мм, $h = 1000$ мм). Установка Э-3 позволяет размещать морские зонды и измерители в камере избыточного давления целиком и проводить их испытания и поверку в условиях, приближенных к натурным.

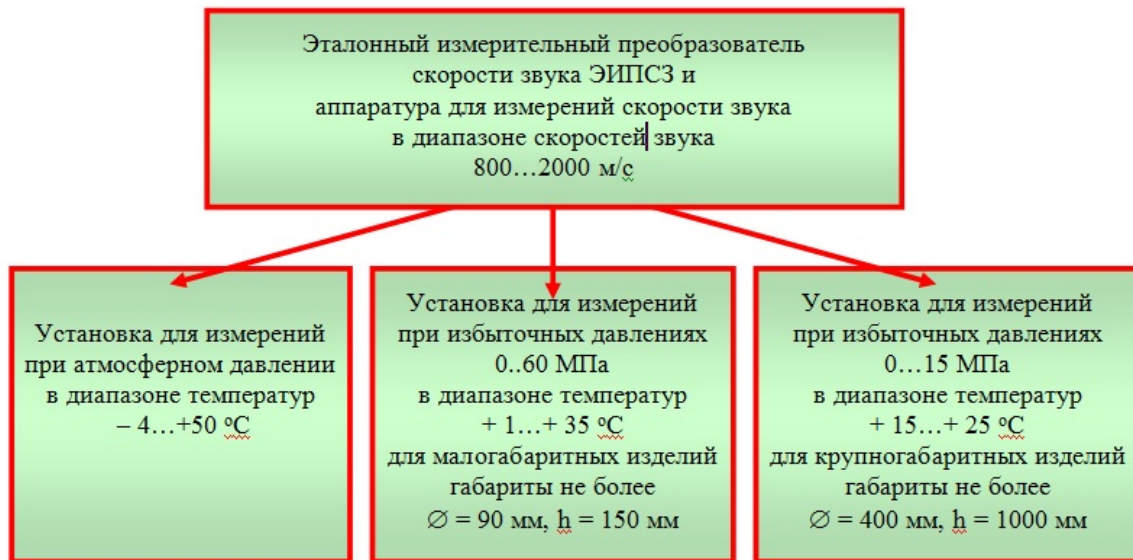


Рисунок 1 - Структурная схема Государственного первичного эталона единицы скорости звука

Основным элементом при воспроизведении единицы скорости звука и передачи ее размера подчиненным средствам измерений скорости звука является эталонный измерительный преобразователь скорости звука – ЭИПСЗ.

ЭИПСЗ и аппаратура для измерений скорости звука являются общими для всех установок.

В состав ГПЭ входит также измерительный преобразователь скорости звука ИПСЗ, получающий размер единицы скорости звука от ЭИПСЗ и отличающийся от него конструкцией, длиной акустической базы, количеством пьезоизлучателей, габаритами. Благодаря своей жесткой конструкции, он может быть использован в качестве «эталона-переносчика» для передачи размера единицы рабочим эталонам или рабочим средствам измерений как на ГПЭ, так и на месте их эксплуатации.

Принцип действия ЭИПСЗ и ИПСЗ одинаков. Они инвариантны к свойствам жидкости. Для выполнения этих условий в них реализован времяпролётный импульсный метод измерения скорости звука. Прямая реализация этого метода позволяет измерять скорость звука в жидкости с погрешностью (0,3 - 0,5) м/с, поскольку метод отягощён неконтролируемыми погрешностями, основными из которых являются временные задержки сигнала в электронно-акустической цепи измерителя, эффекты на границе раздела сред, дифракционные эффекты. Для исключения ряда перечисленных источников погрешностей применён дифференциальный метод с постоянной базой.

3 Рабочий эталон 2-го разряда единицы скорости звука в водной среде РЭСЗ

Анализ современных систем измерений подводного шума и комплексов гидроакустического обнаружения (бортовых и стационарных) показывает, что для повышения точности измерений, эффективности обнаружения и классификации подводных объектов необходимо получение наиболее полной и достоверной информации о гидрофизических характеристиках среды распространения звука в месте проведения измерений и в районах мирового океана, где выполняются задачи по обнаружению и классификации подводных объектов.

Для получения данной технической информации в эксплуатации находится большой парк технических средств для измерения скорости звука в воде, которые, как правило, входят в состав различных комплексов надводных кораблей, гидрофизических судов, авиации и полигонов. В эксплуатации находятся сотни различных измерителей скорости звука из них половина имеет погрешность больше 1 м/с.

Учитывая данные по метрологическим характеристикам современных средств гидроакустических измерений, а так же средств измерений первичных параметров водной среды - температуры, электропроводности и давления можно сделать заключение, что для обеспечения допустимых значений погрешностей при решении указанных выше задач, необходимо измерять скорость звука с

погрешностью не хуже нескольких десятых метра в секунду в соизмеримых пространственно-временных масштабах. Лучшие образцы отечественных судовых средств измерений скорости звука имеют предельную погрешность измерения 0,4 м/с.

Учитывая вышеизложенное в целях совершенствования метрологического обеспечения гидроакустических и гидрофизических измерений в области единиц скорости звука был разработан и создан эталон второго разряда единицы скорости звука в водной среде РЭСЗ, который поставлен заказчиком и успешно эксплуатируется.

Основные технические характеристики РЭСЗ приведены в таблице 1.

Основным элементом РЭСЗ является подводный измерительный модуль. Особенностью этого модуля является наличие внутренних источников питания, которые дают ему возможность автономно работать при натуральных измерениях.

Таблица 1 - Основные характеристики РЭСЗ

Диапазон воспроизведения единицы скорости звука и передачи ее размера в жидких средах, м/с	от 1403 до 1600
Допускаемая абсолютная погрешность измерений скорости звука при доверительной вероятности $P = 0,95$, м/с	от $\pm 0,4$ до $\pm 0,8$
Среднее квадратическое отклонение результата измерений скорости звука не превышает, м/с	$\pm 0,005$
Работоспособность в диапазоне температур, °С	от - 4 до +50
Работоспособность в диапазоне избыточных давлений, МПа	от 0 до 60
Автономное время работы, ч	6

В заключение хотелось бы отметить, что за последние десять лет во ФГУП «ВНИИФТРИ» сделано немало для обеспечения единства измерений скорости звука в водной среде. Но предстоит сделать еще не мало.

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» готовы предоставлять единицу скорости звука в водной среде для нужд народного хозяйства и промышленности. Мы готовы разрабатывать и создавать рабочие средства измерений и рабочие эталоны. Однако потребители не считают целесообразным использовать отечественные разработки, а предпочитают закупать и пользоваться английскими и датскими средствами измерений. Также очень мало рабочих средств измерений проходят реальную периодическую поверку, что не может не беспокоить.

Литература

1. Белогольский, В. А., Саморукова, Л. М., Сильвестров, С. В. Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах.// Метрология гидроакустических измерений. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Том 1. Труды ВНИИФТРИ. 2012.
2. Белогольский, В. А., Саморукова, Л. М., Сильвестров, С. В. Времяпролетный способ определения скорости звука в жидкой среде и устройство для его осуществления. // Патент № 2529734.

ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА GIGATESS

А. Б. Талуц¹

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, РФ, e-mail: vgranovsky@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: АПК GiGaTesS, проблемы, пожелания

В докладе рассматриваются проблемы, возникшие при эксплуатации АПК GiGaTesS начиная с 2012 года по 2016 год. Так же приведены и намечены пути дальнейшего развития и улучшения качества работы поверителя при использовании данного комплекса.

Введение

Начиная с 2008 года на предприятии АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» возникла необходимость в модернизации измерительной техники, в связи с этим было закуплено большое количество современных приборов: мультиметров, осциллографов и цифровых вольтметров. Загрузка поверителей в отделе 068 увеличилась в пять раз и для обеспечения выполнения плана поверки в 2010 - 2012 годах был внедрён аппаратно-программируемый комплекс (АПК) GiGaTeSS для проверки мультиметров, осциллографов и цифровых вольтметров в автоматическом режиме.

1. Особенности измерений и поверки при помощи АПК

Уменьшение времени поверки. Уменьшено время поверки мультиметра APPA 109 N – с 8 до 2 ч, осциллографов с (3 – 4) ч (по «Типовым нормам времени на поверку средств измерения») до 1 ч, включая подготовку к поверке осциллографа. В Концерне подлежат ежегодной поверке около 500 мультиметров с цифровыми вольтметрами и 125 осциллографов, которые возможно поверить с помощью АПК. Экономия времени на поверку составляет примерно 2000 нормо-часов. А учитывая, что поверка одного вольтметра в ЦИС Тест в Санкт-Петербурге стоит 5 000 руб. плюс затраты на доставку туда и обратно этих приборов, то получается, что экономия за год составляет более двух миллионов рублей. При проверке по заранее запрограммированному алгоритму снижается, но, к сожалению, не исключается ошибка оператора, которая может привести к порче оборудования. Ниже рассмотрены причины, вызывающие эти ошибки.

2. Недостатки, выявленные в процессе эксплуатации АПК

Необходимость разрабатывать самостоятельно протоколы поверки, несмотря на то, что в договоре на поставку оборудования были заложены принципы полной готовности АПК к работе, в том числе, и разработка поставщиками протоколов поверки.

Ненадёжная система лицензирования – при смене конфигурации АПК для выполнения конкретной выполняемой функции система теряет ноутбук и не позволяет работать до получения новой лицензии. Новая лицензия получается путем запроса к поставщикам через интернет – что в «Электроприборе» связано с некоторыми сложностями. Привязка программного обеспечения (ПО) к комплексу администрирования. В «Руководстве по эксплуатации», поставляемом с АПК, не отражены вопросы работы АПК в целом, конкретного подключения аппаратуры, её соединения в комплекс. Документ, по существу, является описанием программного продукта, а не руководством для поверки. Это вносит сложности в работу поверителей. Оператору необходимо обладать навыками программирования при редактировании шаблона протокола и при установке системы на ноутбук, так как применено нелицензированное ПО. Ненадёжная работа видеоканалов - меняются параметры работы по непредсказуемому алгоритму и в процессе поверки приходится перенастраивать параметры видеоканалов. В случае сбоев в работе АПК, особенно в части программы, невозможно обеспечить консультацию или ремонт АПК, т.к. предприятие находится на территории республики Беларусь.

Невозможна замена калибратора на аналогичный, в случае его поверки или по другой причине, так как это приводит к полной остановке работы АПК. Подключение поверяемых осциллографов и калибратора жестко привязано к определенным разъемам на ноутбуке, в противном случае АПК не работает, но это не указано в руководстве по эксплуатации.

Заключение по опыту использования АПК до 2016 г.

В связи с перечисленным выше, к сожалению, приходится констатировать, что АПК GiGaTesS обладает рядом недоработок. Поэтому потребовалось больше года для его внедрения. По этой же причине не удалось внедрить его в филиале в Гатчине.

¹ Инженер 1 категории.

КАЛИБРОВКА ПРИЕМНИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОКРУЖАЮЩЕГО ПОДВОДНОГО ШУМА

А. Е. Исаев¹, И. В. Черников², А. С. Николаенко³

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Российская Федерация, e-mail: ¹isaev@vniiftri.ru, ²iii@vniiftri.ru, ³anikolaenko@vniiftri.ru

Аннотация

Ключевые слова: гидроакустика, подводный шум, калибровка, диффузная зона, реверберация

Изучение вредного воздействия шума на человека привело к необходимости стандартизировать в воздушной акустике требования к приемнику звука, методики измерений, методы калибровки приемника и использование данных калибровки в зависимости от цели измерений. Те же задачи поставила перед подводной акустикой необходимость измерять окружающий шум в океане в связи с возросшим вниманием к экологии моря. При измерениях в море применяют приемники звука, которые по конструкции и характеристикам значительно отличаются от лабораторного гидрофона. Однако, требования к конструкции приемника подводного звука, его свойствам и характеристикам, а также правила нормирования этих характеристик сегодня не сформулированы. Отсутствие стандартов вынуждает применять при калибровке приемника стандарт на калибровку гидрофона. Но использование чувствительности и характеристик направленности по свободному полю может оказаться деструктивным. При измерениях окружающего подводного шума мощность принимаемого сигнала распределена по частоте, а преимущественное направление приема отсутствует. В докладе приводится пример увеличения неопределенности результата измерений окружающего подводного шума при использовании результатов калибровки приёмника по свободному полю. Для таких измерений предпочтительно использовать чувствительность приемника по диффузному полю. Однако по качеству диффузного поля реверберационный бассейн значительно уступает реверберационной камере в воздушной акустике. В докладе обсуждается метод калибровки по диффузному полю, основанный на пересчёте частотных откликов по свободному полю. Измерения выполняют в диффузной зоне реверберационного бассейна при излучении шумового сигнала.

Введение

Изучение вредного воздействия шума на человека привело к необходимости стандартизировать в воздушной акустике требования к приемнику звука, методики измерений, методы калибровки приемника и использование данных калибровки в зависимости от цели измерений. Те же задачи поставила перед подводной акустикой необходимость измерять шум в океане в связи с возросшим вниманием к экологии моря.

Проблемы использования стандартных калибровочных данных при измерениях в морских условиях

Для измерений подводного шума применяют гидрофон с известными характеристиками. Требования к характеристикам измерительного гидрофона установлены в стандарте МЭК 60500. Эти характеристики определяют при калибровке гидрофона в соответствии со стандартом МЭК 60565 и используют при измерениях.

При измерениях в море используют приемник - специальную конструкцию, в которую устанавливают калиброванный гидрофон. Элементы конструкции приемника отражают и рассеивают падающую звуковую волну. Стало очевидным, что применение данных калибровки гидрофона некорректно и необходимо калибровать весь приемник в том виде, как его опускают в море. Поскольку существует только стандарт на калибровку гидрофона, этот стандарт вынужденно используют для калибровки приемника.

Выяснилось, что характеристики приемника существенно отличаются от характеристик гидрофона (частотная характеристика отличается от плоской, и изрезана осцилляциями). Полученные результаты обнажили две проблемы: как следует калибровать приемник и как использовать результаты калибровки для измерений шума в море?

Этих проблем не существует для гидрофона, который применяют для измерений в лабораторных условиях (в условиях близких к тем, при которых выполняли калибровку). Результаты калибровки приемника также применимы лишь в тех условиях, которые существовали при калибровке. Однако, в отличие от гидрофона, приемник используют для измерения шума, в то время как по МЭК 60565 калибровку выполняют тонально-импульсным методом.

К чему это приводит, поясним на примере приемника, для которого на рисунке 1 изображены с шагом 1/6 октавы: частотная характеристика гидрофона, который затем установили в приемник (кривая

¹ Доктор технических наук, начальник лаборатории.

² Научный сотрудник.

³ Начальник отдела.

1), частотная характеристика приемника (кривая 2). Частотная характеристика гидрофона слабо зависит от частоты и близка к плоской на частотах ниже 40 кГц. Частотная характеристика приемника изрезана осцилляциями, вызванными рассеянием звуковой волны конструкцией приемника. Размах осцилляций достигает 8,5 дБ и не уменьшается с частотой.

Подобные осцилляции частотного отклика (характерный признак источника рассеяния звуковой волны вблизи гидрофона) также были выявлены при градуировке в NPL гидроакустического рекордера AURAL 2 [1].

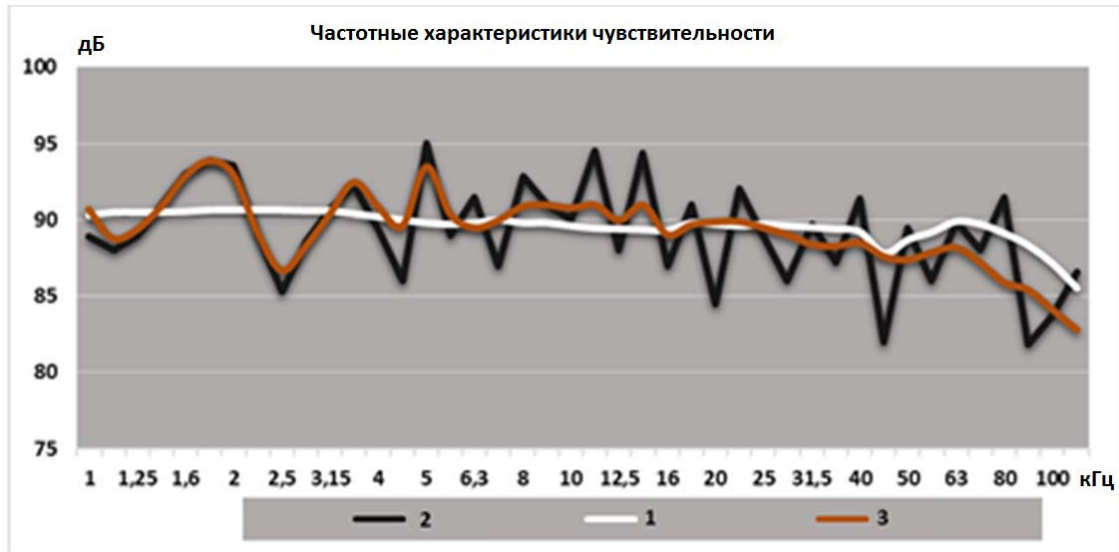


Рисунок 1 - Частотные характеристики гидрофона и приемника

Проблему «как калибровать» проще всего отнести на счет плохой конструкции приемника. Однако эта проблема и в процедуре калибровки - прямом применении МЭК 60565. Результаты измерений шума тем же приемником можно улучшить, если изменить процедуру калибровки так, чтобы в ней были учтены особенности использования приемника. Например, предположив, что спектры измеряемого подводного шума не содержат резких изменений в пределах 1/3 октавной частотной полосы, можно выполнить калибровку приемника не на частотах 1/3 октавного ряда, а в 1/3 октавных частотных полосах [2, 3]. Использование чувствительности гидрофона на частоте не приводит к существенным погрешностям при измерениях шума в частотной полосе, поскольку в пределах частотной полосы чувствительность гидрофона мало изменяется. В противоположность гидрофону использование чувствительности приемника на частоте приводит к значительным погрешностям при измерениях шума в полосе частот. На частотах от 8 кГц и выше частотная характеристика приемника совершает несколько осцилляций в пределах каждой 1/3 октавной частотной полосы. При этом возникает проблема выбора (в пределах 1/3 октавной полосы) значения чувствительности для измерений шума в этой полосе частот. Проблему выбора значения чувствительности можно решить, если измерить подробную частотную характеристику приемника в 1/3 октавной полосе частот и рассчитать чувствительность в этой полосе как СКЗ частотной характеристики [2, 3]. Выполненные математическое и экспериментальное моделирования показали существенный выигрыш от такой калибровки приемника при измерениях шума в сравнении с традиционной калибровкой.

Кривой 3 на рисунке 2 изображена частотная характеристика чувствительности приемника в 1/3 октавных полосах частот. Кривая 3 не имеет резких изменений на высоких частотах, однако сохраняет осцилляции на низких частотах. На высоких частотах осцилляции сглажены усреднением в широких частотных полосах. Осцилляции на низких частотах обусловлены уменьшением частотного интервала усреднения (ширины 1/3 октавной полосы).

Использование результатов калибровки 1/3 октавных полосах частот привело к неожиданному результату при измерениях окружающего шума в море. На рисунке 2 представлены 1/3 октавные уровни подводного шума, кривой 1 - измеренные гидрофоном, откалиброванным по МЭК 60565, кривой 2 – измеренные приемником, откалиброванным в 1/3 октавных частотных полосах.

Различия кривых 1 и 2 на частотах выше 6,3 кГц не превышают 1,5 дБ, что можно считать приемлемым при существующих нормах на измерения подводного шума. На частотах ниже 6,3 кГц различия возрастают до 4,5 дБ, причем поведение кривой 2 повторяет осцилляции частотной характеристики приемника (см. рисунок 1). Использование чувствительности в 1/3 октавных частотных полосах не привело к повышению точности измерений на низких частотах.

Полученный результат объясняется двумя обстоятельствами. Первое заключается в самом определении чувствительности по свободному полю, которое применяли при калибровке приемника. Чувствительность по свободному полю определена для частоты и для опорного направления. При измерениях в море это подразумевает прием звука с опорного направления и на известной частоте. Такие ограничения мало влияют на результаты измерений гидрофоном, который обладает малой направленностью и неравномерностью частотного отклика. Результаты калибровки гидрофона в лабораторном водном резервуаре в опорном направлении и на частоте можно использовать для измерений шума с любого направления. В отличие от гидрофона, для приемника нельзя пренебрегать ограничениями, которые накладывает само понятие чувствительности по свободному полю. Выполнив калибровку приемника по свободному полю в 1/3 октавных частотных полосах удалось «правильно» учесть неидеальность приемника. В итоге получили значения чувствительности, подходящие для измерения шума.

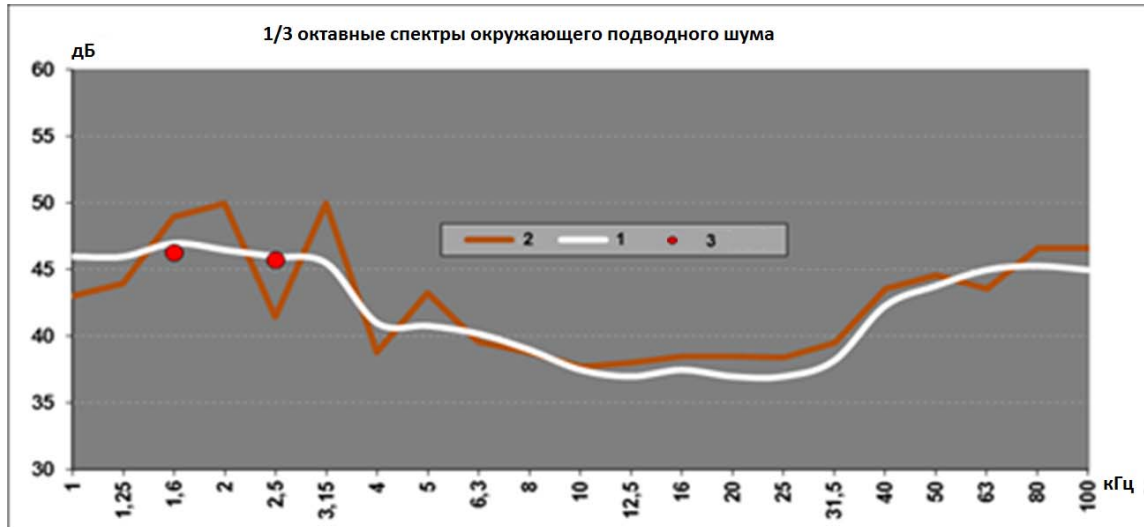


Рисунок 2 - 1/3-октавные спектры

Однако пользоваться результатами такой калибровки можно при приеме шума с опорного направления, поскольку они применимы только для выделенного (опорного) направления приема. И именно в этом заключается второе обстоятельство - результаты калибровки использовали не при измерениях шума с опорного направления, а при измерении фонового (окружающего) шума в отсутствие преимущественного направления падения звуковой волны на приемник.

При исследовании приемника было установлено: наибольшее влияние рассеянной звуковой волны проявится при падении звуковой волны с опорного направления, что является причиной значительных провалов и выбросов на характеристике направленности приемника в опорном направлении на частотах экстремумов частотного отклика. На рисунке 3 показаны характеристики направленности приемника на частотах 1,8 и 2,5 кГц. Подобные искажения характеристик направленности типичны для приемников симметричной формы, имеющих локализованный источник рассеяния, например, рекордер AURAL 2 [1]. И у рекордера, и у приемника осцилляции частотного отклика при фронтальном падении звуковой волны превышают осцилляции при траверсном падении и вносят основной вклад в неравномерность характеристик направленности.

Следствием калибровки в 1/3 октавных полосах частот стало уменьшение неравномерности характеристик направленности и знакопеременных расхождений в результатах измерений шума. На низких частотах этого не произошло и направленные свойства приемника проявились в результатах измерений спектра окружающего шума.

На рисунке 3 окружностями (ряд 2) показаны средние (при изменении угла падения от 0° до 360°) значения чувствительности приемника. На рисунке 3 отдельными точками (ряд 3) показаны уровни шума, рассчитанные по средним значениям чувствительности. Использование при измерениях окружающего шума чувствительности приемника по диффузному полю уменьшило расхождения в результатах измерений шума и на низких частотах.

В воздушной акустике микрофон свободного поля не применяют в диффузном поле и наоборот. Процедуру калибровки приемника для измерений окружающего шума целесообразно усовершенствовать таким образом, чтобы избавиться от влияния на чувствительность направленности приемника: требование «калибровка в 1/3 октавных полосах частот» необходимо дополнить требованием

«калибровка по диффузному полю». Это не исключает калибровки этого же самого приемника по свободному полю.

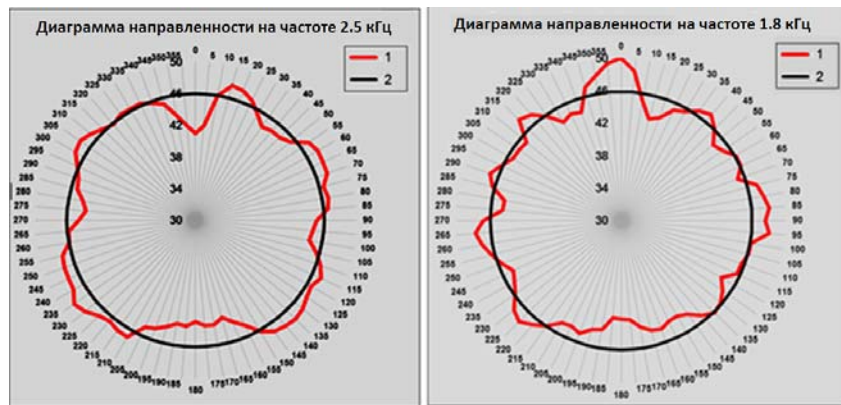


Рисунок 3 – Диаграмма направленности приемника

Ниже будет показано, что выполнить калибровку гидроакустического приемника по диффузному полю в водном резервуаре аналогично тому, как это делают в воздушной акустике, не удастся. Решение может быть основано на использовании подробных частотных откликов приемника по свободному полю.

Шумовое реверберационное звуковое поле в лабораторном водном резервуаре

Исследования изотропности и однородности шумовых реверберационных полей выполнили в водных резервуарах с открытой поверхностью: большом (с бетонными дном и стенами размерами 6х9х6 м) и малом (из оргстекла размерами 1,5 x 1 x 1 м). На рисунке 4 для частот 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 80 кГц представлены зависимости уровней звукового давления в полосе 3 кГц от расстояния между излучателем и приемником в шумовом реверберационном поле большого водного резервуара. На рисунке 4 выделены области, которые в архитектурной акустике принято называть зонами свободного поля, диффузного поля и переходной зоной. Зонную структуру звукового поля в малом водном резервуаре можно рассматривать как копию зонной структуры в большом водном резервуаре в масштабе 1/6.

Наклонными штриховыми прямыми на рисунке 4 показано поведение уровня звукового давления в идеальном свободном поле сферической волны, горизонтальными - в идеальном диффузном поле. По отклонению экспериментальных зависимостей от прямых оценивали близость реверберационного поля к свободному и диффузному.

Для проверки изотропности звукового поля использовали приемник с существенно неравномерной характеристикой направленности по свободному полю и измеряли характеристики направленности приемника в диффузной зоне в полосе частот 3 кГц.

В диффузном поле направленность приемника отсутствует, и характеристика направленности должна иметь вид окружности. Если характеристика, измеренная в шумовом реверберационном поле, заметно отличается от окружности, то звуковое поле существенно не диффузное. Изменение характера изрезанности и уменьшение глубины провалов характеристики направленности дают возможность получить оценки изотропности звукового поля.

На рисунке 5 приведены характеристики направленности приемника на частотах 25 и 30 кГц, кривыми 1 – в свободном поле (измерены тонально-импульсным методом при расстоянии 0,7 м до излучателя), кривыми 2 – измеренные в частотных полосах 3 кГц в диффузной зоне шумового реверберационного поля. Характеристики по свободному полю изрезаны многочисленными узкими провалами глубиной до (35 – 40) дБ. Кривые 2 намного равномернее кривых 1: глубокие узкие провалы отсутствуют, а неравномерность не превышает (4 – 5) дБ. Сравнив неравномерность характеристик направленности по диффузному полю и отклонения уровней звукового давления в диффузной зоне от горизонтальной прямой, можно сделать вывод о том, что возможности калибровки по диффузному полю в большом водном резервуаре ограничены неопределенностью 3 дБ. Такая неопределенность калибровки не удовлетворяет современным требованиям к точности измерения подводного шума.

На рисунке 6 приведены результаты аналогичных исследований в диффузной зоне малого водного резервуара. Неравномерность характеристик направленности, измеренных в диффузной зоне, лишь немногим меньше неравномерности характеристик по свободному полю. Качество шумового реверберационного поля в малом водном резервуаре не позволяет выполнить даже грубую калибровку по диффузному полю.

Этими примерами мы хотели показать, что получить в водном резервуаре диффузное поле приемлемого качества не удастся. Возникает проблема: неидеальность гидроакустического приемника и

требования к точности измерений окружающего подводного шума заставляют выполнять калибровку приемника по диффузному полю, в то же время неудовлетворительное качество диффузного поля в водном резервуаре не позволяет выполнить такую калибровку.

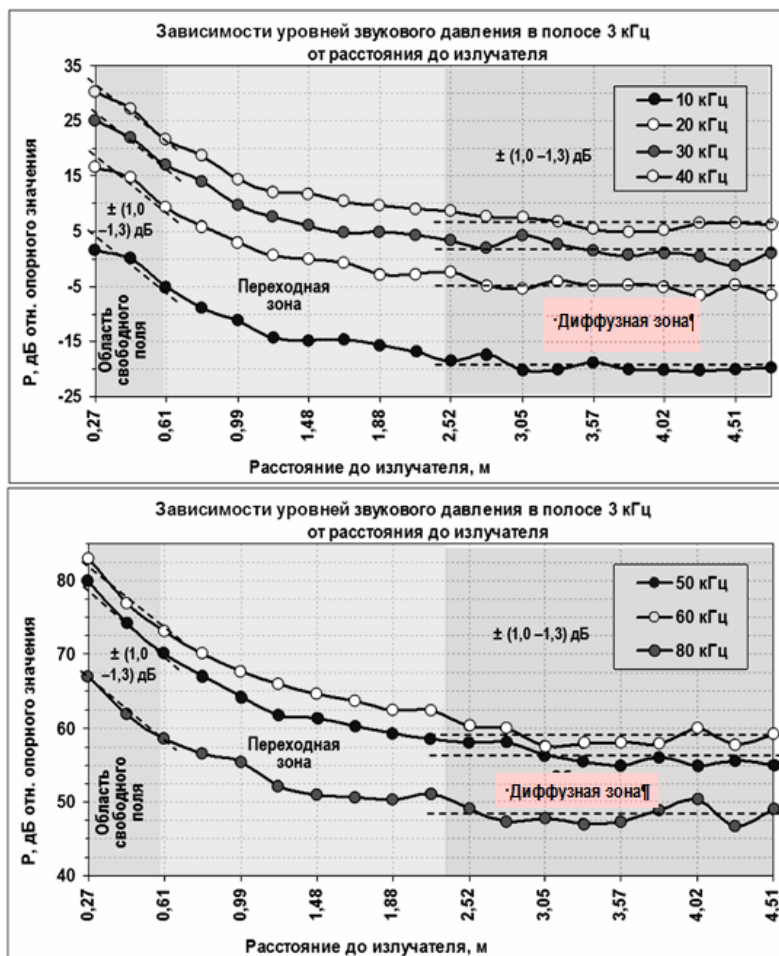


Рисунок 4 – Однородность звукового поля в бассейне

В этой ситуации представляется целесообразным воспользоваться приемом, получившим распространение в воздушной акустике – рассчитывать чувствительность по диффузному полю по результатам калибровки по свободному полю.

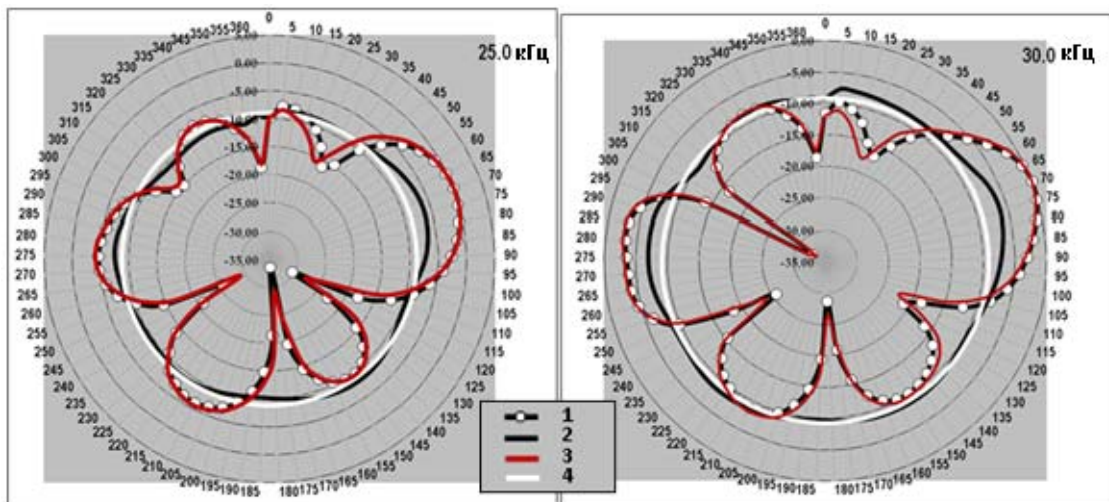


Рисунок 5 - Характеристики направленности приемника (низкие частоты)

Особенность этого приема состоит в том, что для корректного расчета чувствительности по диффузному полю в 1/3 октавных полосах частот требуются частотные характеристики, измеренные с малым шагом по частоте.

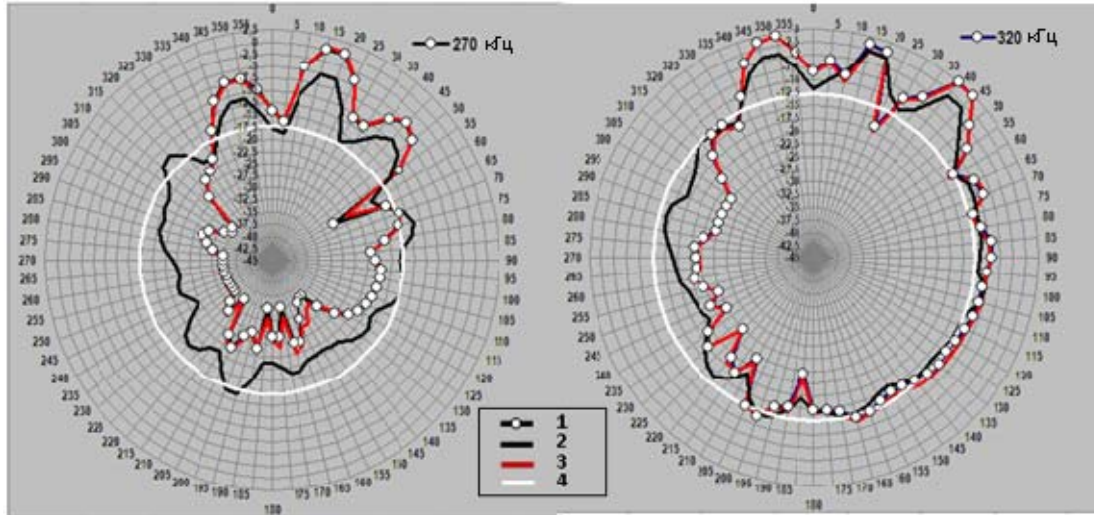


Рисунок 6 - Характеристики направленности приемника (высокие частоты)

Калибровка по свободному полю в шумовом реверберационном поле

Измерения подробных частотных характеристик по свободному полю целесообразно выполнять с использованием широкополосного сигнала, поскольку тонально-импульсный метод неприемлемо затягивает эксперимент. Использование линейной частотной модуляции (ЛЧМ) сигнала позволяет многократно сократить время измерений и ЛЧМ сигнал с успехом применяют для калибровки гидрофонов. При градуировке гидроакустического приемника на гидрофон падают прямая и рассеянные конструкции приемника звуковые волны. Рассеянная волна задержана относительно прямой волны, из-за чего мгновенные частоты прямой и рассеянной ЛЧМ волн не совпадают. При приеме шума спектры прямой и рассеянной волн не различаются. Приемник оказывается в разных условиях при калибровке на ЛЧМ сигнале и при измерениях шума в море, что может сказаться на адекватности результатов градуировки задаче измерений (проблема валидации). Использование для градуировки приемника шумового сигнала, как подобного излучаемому морским объектом, исключает проблему валидации.

Разработанная во ВНИИФТРИ процедура калибровки позволяет с высокой точностью выполнить измерения подробных частотных характеристик гидроакустического приемника по свободному полю в шумовом реверберационном поле водного резервуара, включая диффузную зону [4].

Процедура измерений описана в [4]. Комплексную частотную зависимость передаточного импеданса пары излучатель-приёмник в реверберационном поле определяют как отношение взаимного спектра тока излучателя и напряжения приемника к спектру мощности тока излучателя:

$$\dot{Z}_{RF_k}(f) = \frac{\langle \dot{U}_{RF_k}(f) \dot{I}_{P_k}^*(f) \rangle}{\langle |\dot{I}_{P_k}(f)|^2 \rangle},$$

где $\langle |\dot{I}_{P_k}(f)|^2 \rangle$ и $\langle \dot{U}_{RF_k}(f) \dot{I}_{P_k}^*(f) \rangle$ - оценки соответственно спектра мощности тока излучателя и взаимного спектра тока излучателя и напряжения приемника, которые получают усреднением по реализациям мгновенных спектров тока $\dot{I}_{P_k}(f)$ и выходного напряжения приёмника $\dot{U}_{RF_k}(f)$,

(* обозначает комплексное сопряжение, $\langle \dots \rangle$ - усреднение по реализациям).

Комплексный передаточный импеданс пары излучатель-приёмник по свободному полю получают обработкой передаточного импеданса пары в реверберационном поле по формуле метода CMWA, настраивая характеристику заграждения многополюсного режекторного пространственного фильтра на отражения, подлежащие подавлению [3, 5]:

$$\dot{Z}_{FF}(f, \Delta f_{wa}) = \frac{1}{\prod_i 1/\tau_i} \int_{f-\Delta f_{wa}/2}^{f+\Delta f_{wa}/2} \dot{Z}_{RF}(f-f') W_{wa}(f') df',$$

где $\prod_i 1/\tau_i$ - нормирующий множитель, τ_i - запаздывание i -й отраженной волны в точке приёма, Δf_{wa} - частотный интервал взвешенного усреднения, $W_{wa}(f)$ - взвешивающая функция.

Существенными для решаемой задачи преимуществами метода комплексного взвешанного усреднения (СКВУ) являются минимальное, в сравнении с применяемыми в метрологической практике методами, искажение частотной зависимости усреднением по частоте и возможность обрабатывать компактный фрагмент частотной зависимости, измеряемой в рабочем диапазоне излучателя [6].

Качество условий свободного поля проверяли по экспериментальной зависимости, обратной зависимости звукового давления от расстояния до излучателя ($1/r$). Такие зависимости, полученные на частотах 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 кГц в большом водном резервуаре с применением предложенной процедуры измерений, приведены на рисунке 7 [4]. Расстояние между излучателем и приемником увеличивали с 0,3 до 5 м. Пунктирные прямые на рисунке 7 показывают поведение зависимостей в идеальном свободном поле сферической звуковой волны. Отклонения экспериментальных данных от прямых не превосходят 1,3 %, безотносительно того, в какой зоне водного резервуара (свободного поля, диффузной или переходной), находился приемник.

На рисунке 5 кривыми 3 показаны характеристики направленности по свободному полю, полученные с использованием предложенной процедуры измерений в диффузной зоне на расстоянии 4,7 м от излучателя при излучении шумового сигнала. Кривые 3 практически повторяют кривые 1. Исключение составляют угловой интервал от 15° до 45°, где для обеих частот несовпадения характеристик можно расценить как существенные. Для кривых 1 и 3 на частоте 3 кГц заметны также расхождения на углах от 115° до 125°. Выявленные расхождения не вызваны нарушением на этих углах условий свободного поля в результате применения предложенной процедуры. Отличия объясняются различным влиянием на результаты измерений эксцентриситета использованного крепления приемника, когда расстояния между излучателем и приемником различаются в семь раз.

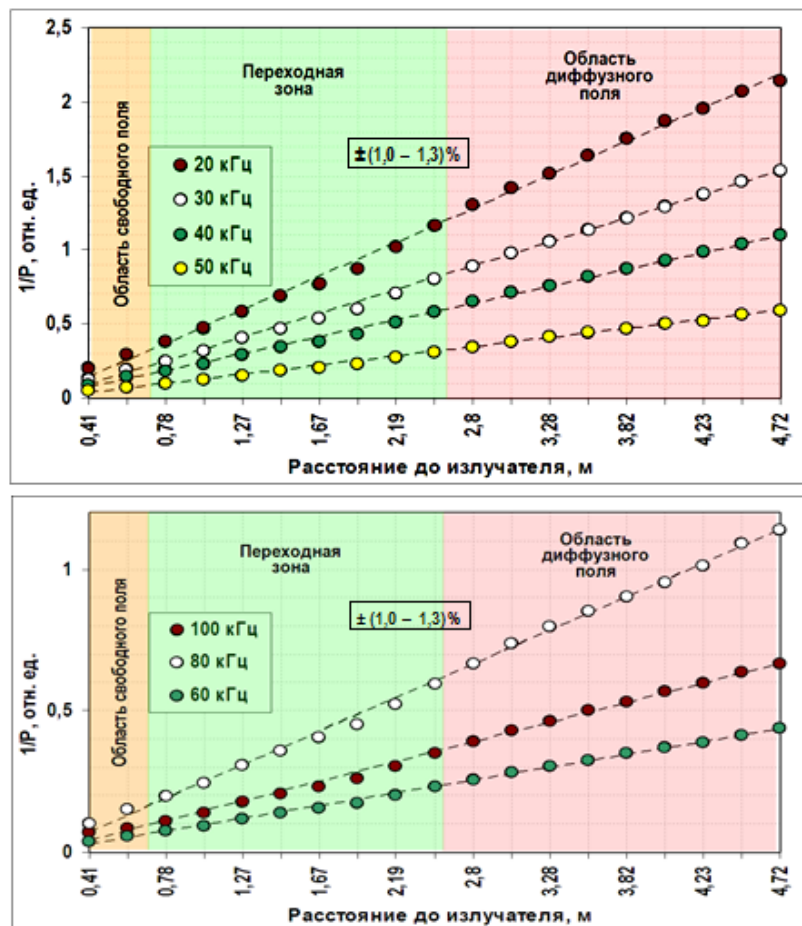


Рисунок 7 - Качество условий свободного поля

Подтверждением сказанному может служить почти полное совпадение характеристик направленности, представленных кривыми 1 и 3 на рисунке 6 полученными в малом водном резервуаре (различия заметны в угловом интервале (150 – 180)°).

Выводы

Предложенная процедура измерений позволяет в условиях лабораторного водного резервуара получать подробные частотные характеристики приемника по свободному полю. При этом появляется возможность, как в воздушной акустике, выполнять калибровку приемника по диффузному полю расчетным методом. Частотные характеристики по свободному полю микрофона получают в безэховой камере. Парадоксальность ситуации с калибровкой гидроакустического приемника состоит в том, что в лабораторном водном резервуаре излучают шумовой сигнал, тем самым создают «диффузное» звуковое поле. В этом поле выполняют точные калибровки по свободному полю, результаты которых могут быть использованы для вычисления чувствительности по диффузному полю.

Метод вычисления чувствительности шумомера по диффузному полю по взвешенным значениям чувствительности по свободному полю для различных направлений падения звуковой волны стандартизован в воздушной акустике. Представляется целесообразным выполнить соответствующие исследования с различными типами гидроакустических приемников, чтобы разработать единый подход к вычислению чувствительности приемника по диффузному полю в 1/3 октавных частотных полосах. Решение этой задачи в рамках мониторинга акустического загрязнения моря потребует общих усилий, поскольку выходит за рамки возможностей одной лаборатории.

Литература

1. **Nauman G., Lepper P., Robinson S.** The calibration and characterization of autonomous underwater recorders // Proc. of the 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics UA2014. – Rhodes, Greece. – 2014. – P. 1103-1108.
2. **Исаев, А. Е.** Лабораторная градуировка приемника для измерений уровней подводного шума корабля /А. Е. Исаев// Измерительная техника. - 2015. - №1. - с. 53-58.
3. **Исаев, А. Е.** Точная градуировка приёмников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. - Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2008, 369 с.
4. **Исаев, А. Е., Черников, И. В.** Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала/Акуст. журнал, - 2015.- том 61.- № 5.- с. 1–9.
5. **Исаев, А. Е., Матвеев, А. Н.** Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне// Акустический журнал. 2009.- Том 55. - № 6. - с. 727 - 736.
6. **Исаев, А. Е.,** Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами// Измерительная техника. – 2014. - № 5. - с. 48-53.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В ПОВЕРОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

М. В. Бородько¹

¹ООО «ЮНИТЕСС», Москва, РФ, УП «ПРОФКОН», Минск, Республика Беларусь,
e-mail: op@unitess.ru

Аннотация

Ключевые слова: автоматизированное рабочее место, система менеджмента и автоматизация в лаборатории, бережливое производство, программное обеспечение поверочной лаборатории

В материале автор и разработчик уникальной системы менеджмента и автоматизации лаборатории UniTesS Бородько М. В. рассказывает об основных принципах построения архитектуры ПО для поверочных лабораторий, презентует возможности автоматизации рабочих мест поверителей, анализирует основные задачи, которые призваны решать современные метрологической службы.

На сегодняшний момент в современном производстве все сильнее обостряются вопросы уменьшения издержек, повышения производительности труда и обеспечения требуемого качества поверки средств измерений и испытаний продукции в рамках подтверждения соответствия. Комплексная автоматизация является абсолютно понятным и разумным шагом для любого руководителя. Со времен разработки первого советского прибора с интерфейсами КОП или СТЫК 2 разработано множество разнообразных программ для автоматизации поверки. Однако, до сих пор автоматизация поверки не стала трендом и имеет очень малый вес в работе лаборатории. Мы выделили, на наш взгляд, основные проблемы, которые препятствуют массовому внедрению автоматизации в современной поверочной лаборатории:

- а) Специфика метрологии, не понятная программистам, которые разрабатывают ПО для отрасли.
- б) Сложность управления приборами, высокие риски при отладке ПО.
- в) Высокая стоимость и длительность разработки ПО.
- г) Короткий жизненный цикл программного обеспечения вследствие замены эталонов, поверяемых СИ и изменения методик.
- д) Сложность проведения валидации ПО (метрологической аттестации).
- е) Несовместимость разных АРМ, разные форматы протоколов, разные интерфейсы пользователя, отсутствие комплексного подхода к автоматизации в лаборатории.
- ж) Сложность внедрения разработок, психологические аспекты восприятия изменений.

Рассмотрим обозначенное выше подробнее. Первое: специалисты при разработке программ для метрологии не до конца понимают специфику отрасли. Например, обычным программистам тяжело понять, что такое неопределенность и как она рассчитывается. Некоторые методики поверки сложны в понимании, а некоторые требуют интерпретации. Зачастую сложные измерительные приборы имеют много нюансов в работе – «плывут» показания, возникают перегрузки и ошибки в работе. Эти факторы требуют постоянных и длительных консультаций со стороны заказчика, что не всегда возможно вследствие высокой загрузки как разработчиков, так и поверителей.

Внедрение ДСТУ ISO/IEC 17025-2001 в испытательных (калибровочных) лабораториях (далее – лабораториях) СНГ обусловило необходимость выполнения требований п. 5.4.6. по оценке неопределенности измерений. Оценка неопределенности результатов измерений в лабораториях является серьезной (наряду с валидацией методик проведения испытаний и обеспечением качества результатов испытаний), ключевой проблемой на пути к обеспечению компетентности лабораторий и взаимному признанию результатов испытаний. Сегодня лабораториям не хватает специалистов, знакомых с концепцией неопределенности измерений, математической статистикой, а понимание и применение вычислительной части основного документа по оценке неопределенности ISO GUM затруднительно без математического образования.

Сложность и объем вычислений, возникающих в практических задачах оценивания неопределенности измерений, требуют значительной квалификации персонала лаборатории. Кроме того, методики, используемые в испытательных (калибровочных) лабораториях СНГ, не описывают процесс оценивания неопределенности, так как основной характеристикой оценки точности результата измерения традиционно является погрешность. В случае если математическая модель измерения сложна и громоздка, то производные (коэффициенты чувствительности) тоже приходится считать численно. Возможно также, сама математическая модель измерения не имеет точного аналитического представления, что делает практически невозможным оценивание неопределенности «вручную». При подсчете расширенной неопределенности, особые сложности возникают с коэффициентами охвата. Во-

¹ Технический директор.

первых – существует несколько разных подходов к их вычислению, в зависимости от предполагаемого закона распределения выходной величины в математической модели измерения, во-вторых – сам подсчет без численных методов произвести невозможно (на практике, используют неточные табличные данные).

Решение же проблемы автоматизации процесса вычисления оценок неопределенности измерений для лабораторий стран СНГ, по-видимому, позволит ускорить внедрение в практику самой концепции оценивания неопределенности измерений как основного фактора, влияющего на сопоставимость результатов испытаний.

Второе, не менее важное: в процессе разработки и отладки ПО, которое управляет сложными измерительными приборами, существуют очень большие риски порчи эталонных и поверяемых СИ вследствие:

- отсутствия знаний у программиста о методиках поверки, управлении приборами, схемах подключения;

- ошибок в предварительных версиях программного обеспечения;

- устаревших интерфейсов КОП и СТЫК 2;

- ошибки в программном обеспечении самих СИ при работе с интерфейсом;

- наличие СИ без интерфейсов управления.

Третье: работа программиста стандартизирована и состоит из следующих этапов: бизнес-оценка и разработка технического задания, разработка архитектуры ПО и общих методов работы (как управлять приборами, составлять отчеты, взаимодействовать с базой данных и т.д.), разработка первоначальной версии ПО, тестирование, внедрение.

На разных этапах к работе привлекаются различные специалисты: бизнес-аналитики, руководитель проекта, архитектор, программисты, специалисты по тестированию и внедрению.

Этими факторами обуславливаются длительные сроки и высокая стоимость разработки ПО.

Четвертое: короткий жизненный цикл ПО. Как правило, через пару лет после внедрения ПО меняются методики поверки, закупаются новые эталоны, поступают новые типы СИ в поверку и возникает задача внесения изменений в ПО. Это бывает очень затратно, как по времени, так и по стоимости. Кроме этого, вследствие текучести кадров, невозможно найти программистов, выполнявших проект. Зачастую приходится переделывать весь объем работы заново.

Пятое: при внедрении любого ПО, лаборатория должна провести валидацию и верификацию применяемых методов измерений. Самый частый вопрос от пользователей АРМ: как доказать проверяющим органам, что поверка (испытания, калибровка) проходит в соответствии с установленными методиками и принятыми стандартами? И не менее часто возникает вопрос, что делать с программами, которые переданы в лабораторию на диске, без необходимых доработок, обучения сотрудников, настройки и отладки оборудования? Закрытая архитектура типового ПО не позволяет увидеть промежуточные значения. Пользователь видит только конечный результат.

Шестое: всегда, когда речь идет о комплексной автоматизации в лаборатории, встает вопрос о несовместимости различных ПО от различных производителей, различных форматах протоколов и интерфейсов пользователя. В то же время, один из самых ожидаемых эффектов от внедрения АРМ состоит во взаимозаменяемости сотрудников и окупаемости программы. Однако, программное обеспечение от разных производителей имеет разные интерфейсы пользователя, функциональные возможности и т.д. И далеко не всегда новый сотрудник может сразу работать на новом рабочем месте.

Для руководителя лаборатории, наличие разнообразных автоматизированных рабочих мест не позволяет всецело оценить эффект от внедрения автоматизации, вследствие отсутствия комплексности, единства решений и объединения АРМ в целостную систему.

Для результативного решения необходимо рассматривать именно комплексный подход – от автоматизации бизнес-процессов (управление лабораторией, анализ задач и результатов, учет СИ, распределение рабочей нагрузки) до автоматизации измерений и составления протоколов и свидетельств.

Основа любой системы автоматизации – это обеспечение выполнения целевых функций технологического процесса испытаний, поверки или всего производства изделия в целом. Таким образом, при универсальности системы автоматизации, она должна решать четко определенный круг задач, обеспечивать достижение заданной цели, максимально конкретной, клиентоориентированной. Несмотря на несомненную очевидность и безоговорочность этого тезиса, именно формализм «автоматизации вообще» губит на корню весь эффект от внедрения таких систем. Создание частных систем автоматизации, удовлетворяющих требованиям конечных пользователей – основная цель работ в области автоматизации.

И, наконец, для многих компаний, занимающихся разработкой ПО для лабораторий, очень острый вопрос состоит в психологической сложности внедрения. Очень важно чтобы внедрение ПО не отражалось на положении сотрудников – при внедрении новых ПО следует стремиться ничего не ломать

и в то же время организационно обеспечить нормальную работу. Внедрение ПО должно давать предприятию реальную отдачу (персонал должен это почувствовать), но с другой стороны – чтобы организационные изменения с первого шага не привели к противодействию.

Организация современных лабораторий, включающих средства вычислительной техники и автоматизации, сталкивается с необходимостью стыковки разного, порой уникального оборудования с ЭВМ. При этом должны быть согласованы функциональные и технические возможности самых разнообразных устройств в условиях многообразия и сложности решаемых задач другой стороны, инженеру-испытателю, поверителю должна быть предоставлена возможность активно участвовать в процессе работы комплекса, быстро перестраивать структуру его функционирования в соответствии с динамикой самого процесса использования комплекса. При этом процесс общения с оборудованием (и с ЭВМ в том числе), должен быть максимально проблемно-ориентирован, выдвигать минимальные требования к знанию средств вычислительной техники. Из сказанного следует два основных направления развития работ:

– решение задач по автоматизации процесса работы лаборатории, включая упрощение общения сотрудника лаборатории с оборудованием в целом (человеко-машинный интерфейс на уровне пользователя: интерфейс верхнего уровня);

– обеспечение программно-аппаратных средств сопряжения различного оборудования с ЭВМ, включая диалоговые средства настройки интерфейса.

Наша компания видит единственный способ устранения вышеперечисленных проблем: предоставить простой и понятный инструмент для метрологов, позволяющий самостоятельно разрабатывать\дорабатывать автоматизированные рабочие места для собственной лаборатории.

Используя популярные языки программирования это сделать практически невозможно, вследствие

- высокой сложности и высокому уровню требований к компетенции сотрудников;
- множественности вариантов разработки программного обеспечения;
- сложности валидации и внедрения.

Для решения этих задач наша команда разработала программное обеспечение для поверочных и испытательных лабораторий: «Систему менеджмента и автоматизации в лаборатории UniTesS», которое позволяет решать все перечисленные выше проблемы.

Для пользователя UniTesS имеют открытую архитектуру и собственный скриптовый язык программирования, позволяющий любому сотруднику, достаточно владеющему компьютером, вносить корректировки добавлять новые алгоритмы измерений. Это гарантирует возможность самостоятельной доработки ПО, без привлечения внешних компаний.

Структурно UniTesS состоит из:

- базы данных UniTesS DB, развернутой на сервере предприятия;
- клиентского ПО UniTesS Manager;
- ПО автоматизированного рабочего места UniTesS APM с опциональным модулем машинного зрения.



Рисунок 1 - Структурная схема системы UniTesS

UniTesS DB – это база данных лаборатории, содержащая всю информацию о выполненных работах, сотрудниках, структуре организации, собственных эталонах/СИ, документах и т.д., обеспечивающая электронный документооборот и производственный процесс.

UniTesS Manager обеспечивает доступ сотрудников к базе данных в зависимости от полномочий, позволяет регистрировать новые задания, контролировать ход работ, формировать отчеты по базе данных, производить администрирование и настройку.

UniTesS APM предназначено для автоматизированного выполнения проверок, калибровок СИ и испытаний оборудования различного назначения с помощью упрощенных скриптов.

UniTesS Vision – опция машинного зрения, обеспечивающая считывание показаний с экрана приборов в случае отсутствия интерфейсов управления.

Функционально UniTesS объединяет множество как автоматизированных, так и не автоматизированных рабочих мест по поверке и калибровке, рабочие места руководителя, ответственных по качеству и СИ, метролога, экономиста и т.д. Так как UniTesS имеет гибкую систему контроля доступа для каждой конкретной лаборатории, можно реализовать любую функциональную схему применения. Например, один сотрудник может только регистрировать образцы, другой назначать работы и сроки, третий контролировать и получать отчетность, четвертый только выполнять работы, пятый проверять/подписывать/утверждать протоколы.



Рисунок 2 - Функциональная схема системы UniTesS

UniTesS DB предназначена для:

- хранения результатов работы;
- анализа данных;
- обеспечения производственного процесса и электронного документооборота.

Общепризнанным сегодня является тот факт, что применение клиент-серверной архитектуры является не только обоснованным, но и желательным (а в некоторых случаях – единственно возможным). Использование централизованного сервера базы данных позволяет сделать ПО масштабируемым в рамках предприятия, т.е. создавать любое количество рабочих мест, на которых будут доступны любые поддерживаемые функции. Более того, можно организовать удаленную работу с базой данных. Пользователи могут иметь доступ к любой информации в базе данных с любого рабочего места. При этом информация всегда будет свежей для всех. База данных UniTesS DB обладает также широкими возможностями резервного копирования и архивации данных.

UniTesS DB содержит широкий спектр информации, в полном объеме характеризующий все аспекты деятельности лаборатории:

- данные об образце: модель, производитель, с/н; код СИ, данные об оплате, время регистрации и возврата, сроки исполнения, отдел, ответственное лицо, движение образца;
- данные о выполненных работах: история протоколов, кто и когда выполнил, кто и когда проверил/утвердил, фотографии (образца, с экрана приборов), отсканированные и загруженные материалы, комментарии сотрудников;
- данные для автоматизации: скрипты для UniTesS АРМ, шаблоны протоколов, реестр видов работ;
- реестр собственных эталонов и СИ: производитель, поставщик, отдел/ответственный, данные о поверках/калибровках/тех. обслуживании, данные по затратам;
- реестр документов: методики поверки, калибровки, измерений, метрологической аттестации, руководства по эксплуатации, ТНПА и др. (пользователь может вводить любые типы документов);
- структура организации/лаборатории: отделы, должности, сотрудники;
- справочники: заказчиков, производителей;
- персональные настройки пользователей;
- настройки полномочий по доступу к данным.

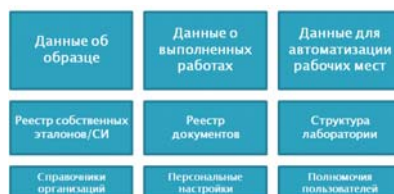


Рисунок 3 - Структура базы данных UniTesS DB

Аутентификация пользователей и разграничение доступа обеспечивают высокий уровень защищенности информации, что является одним из главных преимуществ базы данных UniTesS DB.

Хранимую в единой базе данных информацию удобно анализировать с помощью фильтрации и подсветки. С помощью встроенного SQL-конструктора возможно получать отчетность по различным критериям.

База данных UniTesS DB поддерживает следующие этапы производственного процесса (некоторые опционально):

- регистрация образца;
- определение вида работ;
- назначение исполнителей и сроков;
- выполнение работ;
- контроль выполнения работ;
- проверка и утверждение протоколов;
- возврат образца и выдача протоколов.

ПО UniTesS Manager, совместно с базой данных UniTesS DB, предназначено для организации электронного документооборота, автоматизации производственного процесса, контроля над выполнением работ и анализа результатов деятельности лаборатории.

UniTesS Manager в удобной форме отображает информацию из базы данных, позволяет фильтровать по различным критериям, сортировать, «подсвечивает» цветом в соответствии с персональными настройками пользователя.

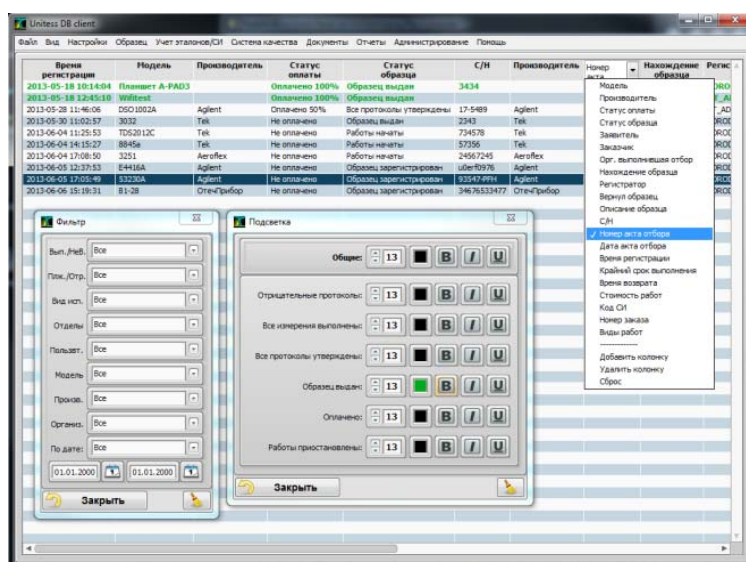


Рисунок 4 - Главное окно UniTesS Manager

UniTesS Manager выводит пользователю список персональных задач: выполнить работу, проверить или утвердить протоколы. У каждой задачи может быть три статуса: нормальная, горячая или просроченная.

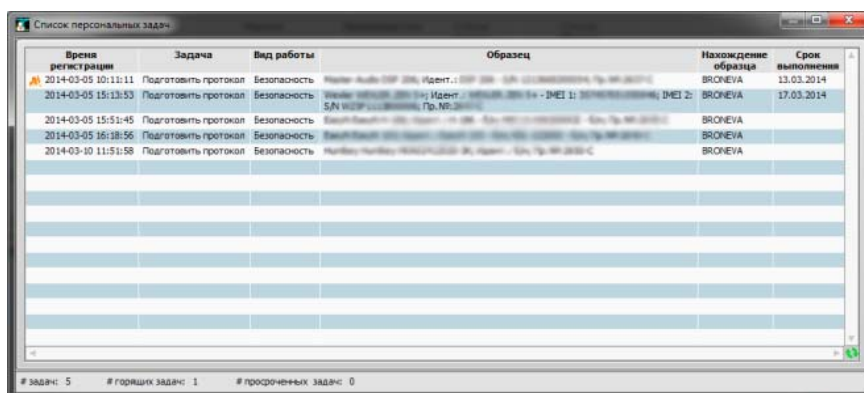


Рисунок 5 - Окно персональных задач

Посредством UniTesS Manager происходит регистрация образцов в базе данных.

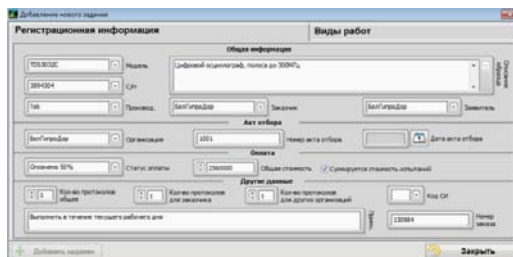


Рисунок 6 - Окно добавления нового задания

Для каждого образца может назначаться несколько видов работ.

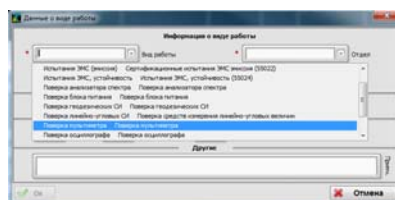


Рисунок 7 - Окно назначения вида работ

После добавления образца в базу данных информация мгновенно доступна всем пользователям. Руководитель может определить ответственных исполнителей, установить крайние сроки выполнения. У исполнителей поставленная задача сразу появляется в списке персональных задач.

UniTesS Manager позволяет увидеть всю информацию об образце:

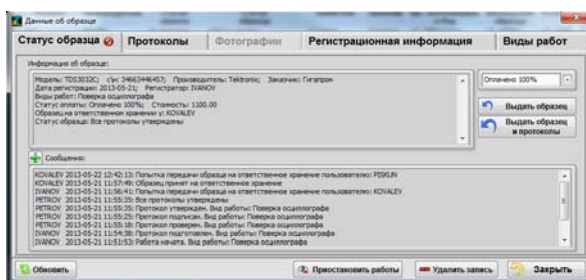


Рисунок 8 - Окно данных об образце

- данные о выполненных работах;
- историю протоколов;
- кто и когда выполнил работу;
- кто и когда проверил/утвердил;
- фотографии, материалы в любом формате;
- комментарии сотрудников;
- движение образца по предприятию.

UniTesS Manager позволяет работать с другими данными из базы:

- реестром собственных эталонов и СИ;
- реестром документов;
- справочниками: заказчиков, производителей;
- структурой организации/лаборатории: информацией об отделах, должностях, сотрудниках;
- данными для автоматизации.

UniTesS Manager поддерживает множество вспомогательных функций:

- централизованное обновление ПО;
- сохранение пользовательских настроек;
- добавление/изменение формы и видов отчетности, с помощью SQL-конструктора;
- гибкие настройки уровня доступа к информации.

ПО UniTesS APM предназначено для автоматизированного выполнения поверок, калибровок СИ и испытаний оборудования различного назначения. UniTesS APM позволяет реализовать любые методики измерений и может взаимодействовать с любыми приборами по интерфейсам: USB, RS232, GPIB/KOPI, Ethernet.

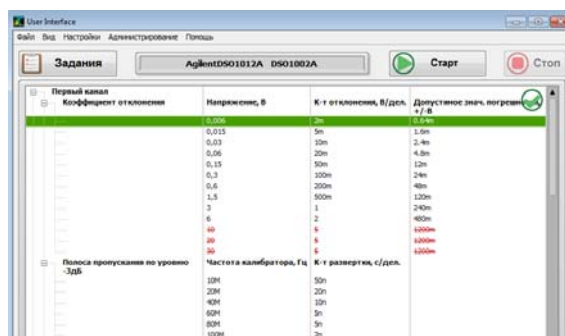


Рисунок 9 - Главное окно UniTesS APM

UniTesS APM выполняет перечень операций, описанных в файле – скрипте. Скрипт (англ. Script – сценарий) – файл, в котором в текстовой форме содержится последовательность действий, реализующих методику измерений. Скрипты для UniTesS APM разрабатываются с использованием языка программирования UnitesS Script Language. Язык специально разработан для автоматизации в метрологии и позволяет реализовать все функции, необходимые для автоматизации: управление приборами, математические расчеты, сравнения, отправку данных в отчет и т.д. Язык упрощен для более быстрого освоения. При разработке скрипта нет необходимости думать о типах данных, взаимодействии с базами данных, формировании отчета.

С помощью собственного языка программирования мы стандартизировали процесс разработки автоматизированного рабочего места.

Для исполнителя UniTesS APM – это программное обеспечение с предельно простым интерфейсом пользователя с тремя кнопками: «получить список заданий», «начать работу», «приостановить работу».

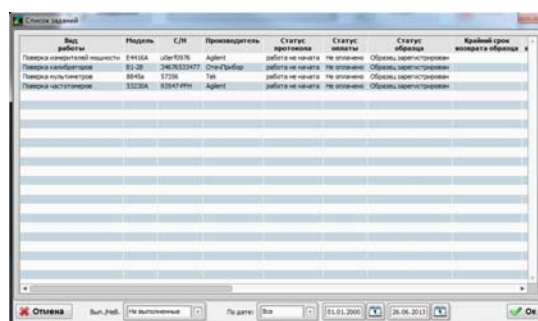


Рисунок 10 - Окно списка задач

После выбора задания пользователю выводится список измеряемых параметров со значениями (точками отсчета) и допусками. На данном этапе пользователь может скорректировать объем проверки. После нажатия кнопки «Старт» пользователю будет предложено заполнить данные для отчета.

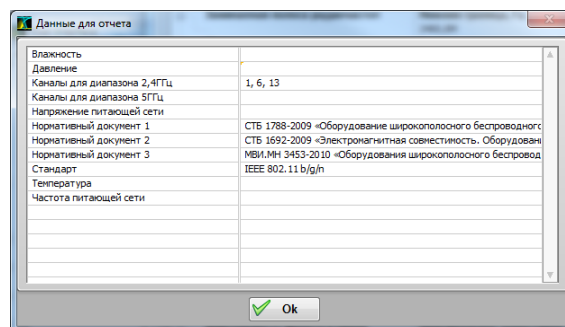


Рисунок 11 - Окно данных для отчета

Введенные данные фиксируются в протоколе. Например, можно указывать условия проведения измерений, используемые ТНПА и эталоны и т.д.

Далее, UniTesS APM управляет эталонами и поверяемыми приборами, считывает показания, рассчитывает неопределенность, сравнивает с порогом и отправляет данные в отчет. При необходимости выводятся сообщения/запросы для пользователей (перекоммутировать схему, подключить приборы).

Если результат выходит за установленные нормы, UniTesS APM предложит подтвердить значение или повторить измерение.

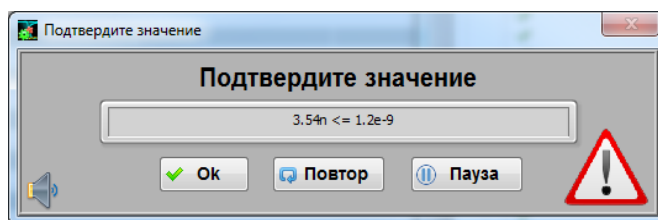


Рисунок 12 - Сообщение-информирование о выходе за допуск

После выполнения скрипта, пользователю выводится итоговое заключение и создается протокол в форматах Word и/или PDF, все результаты измерений передаются в базу данных.

АРМ с частичной автоматизацией

Если в вашей лаборатории используются приборы без интерфейсов управления, рассмотрите вопрос о частичной автоматизации, при которой пользователю в диалоговом режиме выводятся схемы подключений, текст и запрашиваются данные с приборов.

Преимущества частичной автоматизации в диалоговом режиме:

- низкая стоимость разработки;
- увеличение производительности на 30-50%;
- автоматическое создание протокола;
- пониженные требования к квалификации;
- автоматический расчет неопределённости.

– возможность реализации любых методик.

Примеры АРМ для поверки/калибровки СИ:

- мультиметры/вольтметры/клещи;
- осциллографы;
- блоки питания;
- анализаторы спектра;
- генераторы НЧ, ВЧ;
- частотомеры;
- измерители мощности;
- линейно-угловые СИ.

Примеры АРМ для подтверждения соответствия:

- измерение параметров радиоинтерфейсов радиооборудования: LTE, UMTS, GSM, cdma 2000, WiFi, Bluetooth на соответствие зарубежным и отечественным нормативным документам;
- измерение уровня помех (emission);
- испытания на устойчивость (immunity);
- испытания на безопасность.

UniTesS APM + Opt. Debug

UniTesS APM поддерживает режим отладки для коррекции скриптов и разработки новых. Функции будут знакомы всем, кто сталкивался со средами программирования.

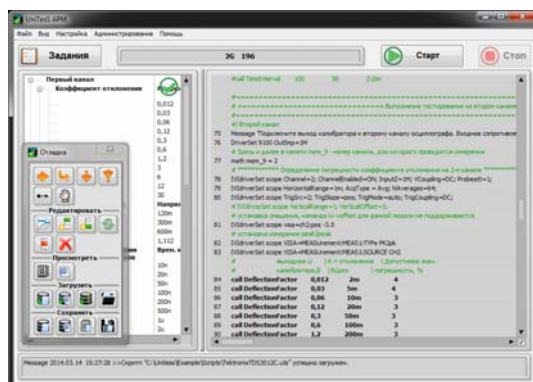


Рисунок 13 - режим редактирования и отладки

С помощью режима отладки скрипта мы предоставляем возможность свободно изменять логику работы, методику, контрольные точки и допуски. Заказчик может собственными силами разрабатывать новые автоматизированные рабочие места.

Таким образом, UniTesS APM позволяет:

- реализовать сложные методики с применением множества эталонных средств;
- управлять приборами по интерфейсам USB, RS232, GPIB, Ethernet;
- с помощью модуля машинного зрения UniTesS Vision считывать и распознавать показания с экранов приборов в случае отсутствия интерфейсов;
- управлять устаревшими приборами по интерфейсу КОП (например, В1-28);
- формировать отчеты в форматах Word и PDF;
- реализовать различные режимы работы: автоматический, полуавтоматический или диалоговый.

UniTesS Vision – модуль машинного зрения для UniTesS APM, предназначен для автоматизации поверки/калибровки приборов без интерфейсов управления.

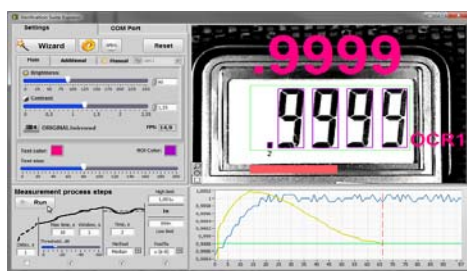


Рисунок 14 - Главное окно UniTesS Vision

UniTesS Vision позволяет считывать показания с экранов приборов с индикаторами любого типа:

- жидкокристаллическими;
- светодиодными;
- газоразрядными;
- семисегментными;
- графическими.

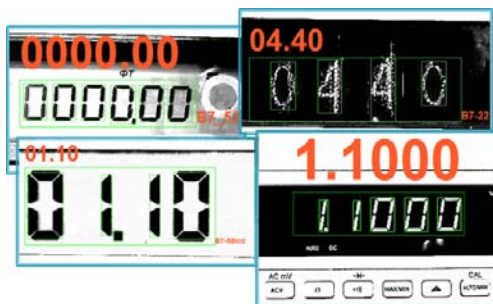


Рисунок 15 - Примеры распознавания значения на разных индикаторах

Процесс считывания показаний состоит из четырех шагов:

- фиксированной задержки между установкой точки на эталонном оборудовании и началом считывания;
- определением (в алгоритме сходимости) момента, когда показания на экране прибора установились;
- выборки в течение определенного времени и расчета среднего квадратического или среднего арифметического значений;
- подтверждения негативного результата в случае выхода значения за границы допуска.

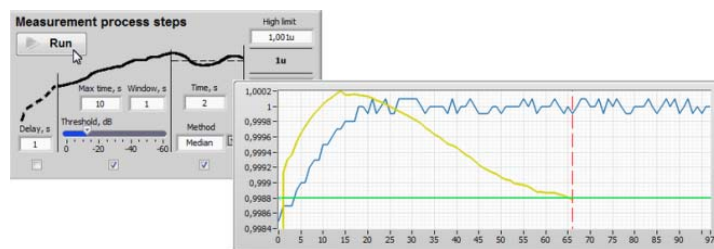


Рисунок 16 - Окна настройки и процесса алгоритма сходимости

Большинство программных средств автоматизации измерительных процессов (например, Fluke Metcal) позволяет считываться только одно показание через фиксированное время, что затягивает процесс в целом и снижает достоверность считанной информации в случае нестабильности показаний. В некоторых приборах (например, мультиметрах) измерение напряжения происходит очень быстро (< 1 с), а измерение большого сопротивления очень медленно (~ 15 с).

Алгоритм сходимости в UniTesS Vision определяет момент установления показаний на экране прибора. Разработанный алгоритм работает как человеческий мозг: оценивается скорость изменения процесса, подбирается размер плавающего окна для анализа и ожидается, пока скорость процесса прекратит изменяться. Алгоритм инвариантен к количеству разрядов. Пользователь задает пороговое значение в децибелах (дБ).

После реализации алгоритма сходимости UniTesS Vision производит выборку в течение заданного времени и производит статистическую обработку (RMS, average, median, max, min).

Если считанное значение выходит за допуск, UniTesS Vision выводит сообщение пользователю – согласен ли он с результатом или необходимо еще раз проверить точку.

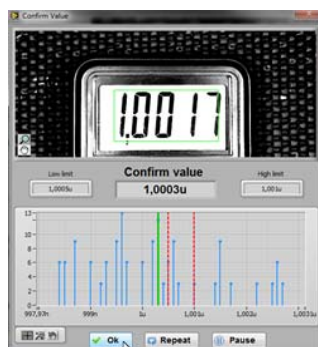


Рисунок 17 - Предупреждение о выходе результата измерений за допуск

Наш алгоритм распознавания проверен на большом количестве разнообразных приборов, но для особых редких типов индикатора мы предусмотрели режим обучения.



Рисунок 18 - Окно режима обучения

Подытоживая вышеизложенное, заметим: система менеджмента и автоматизации в лаборатории UniTesS объединяет возможности метрологической базы данных, менеджера задач, электронного документооборота, автоматизированных рабочих мест и может стать основой для вашей лаборатории. С внедрением UniTesS отпадет необходимость ведения и администрирования нескольких баз данных и программных продуктов.

Для ваших сотрудников UniTesS – это софт с простым интерфейсом пользователя, который всегда подскажет, что делать дальше, поможет сохранить результаты работы и получить необходимую информацию. UniTesS очень прост в освоении и понравится всем сотрудникам, независимо от возраста и квалификации.

Упрощенный язык программирования UniTesS Script метрологи осваивают без специальной подготовки и смогут самостоятельно разрабатывать новые автоматизированные комплексы собственными силами.

Для руководителя UniTesS – это удобный инструмент всестороннего и четкого управления лабораторией: анализ результатов деятельности, контроль над ходом работ, учет загруженности сотрудников и т.д.

При использовании системы UniTesS ни один сотрудник не скажет, что он «не видел», «не знал» о поставленных задачах. Начальник может просмотреть историю образца, проанализировать текущую загрузку подразделений/сотрудников, изменить приоритеты работ.

UniTesS АРМ вместе с модулем машинного зрения позволит вам автоматизировать большинство измерений самостоятельно или с привлечением интеграторов.

В целом UniTesS поможет вам повысить качество и скорость оказываемых услуг, привлечь новых клиентов и, как следствие, принесет дополнительную прибыль.

В заключение нужно отметить, что для любого предприятия процессы, при котором функции управления и контроля, ранее выполнявшиеся человеком, передаются приборам и автоматическим устройствам, это потрясение – необходимость менять устоявшиеся принципы работы на новые. Этот процесс сложен, но необходим для дальнейшего развития лаборатории, качества предоставляемых ею услуг, соответствия современным требованиям и стандартам.

Литература

1. **Андреев А., Барабошкин А., Кислинг В., Костарева Е. О.** фирменной системе метрологического обеспечения // Законодательная и прикладная метрология. – 2000. №1 – 6-7 с.
2. **Дворкин, В. И.** Внутри лабораторный контроль точности результатов измерений по стандартам ГОСТ Р ИСО 5725-1 2002 и ГОСТ Р ИСО 5725-6 - 2002 // Партнеры и конкуренты-2003. № 1 – 26-39 с.
3. **Земельман, М. А.** Метрологические основы технических измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1991. — 228 с.
4. **Назаров, Н. Г.** Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высшая школа, 2002. – 348 с.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А. А. Зуйков¹

ООО «Профигрупп», Санкт-Петербург, РФ, email: zuikov@pg-spb.ru

Аннотация

Ключевые слова: метрология, поверка, автоматизация

В эффективной организации работы метрологической лаборатории большую роль играет программное обеспечение для автоматизации поверки и систематизации ее результатов. Такое программное обеспечение позволяет значительно упростить и ускорить работу метрологической службы. Под автоматизацией поверочной деятельности понимается не только хранение протоколов и свидетельств в электронном виде, но и возможность программировать и управлять работой эталонов и поверяемых приборов. Пример универсального и эффективного программного обеспечения для решения таких задач – Fluke MET/CAL.

Автоматизация позволяет сократить время поверки средств измерений до четырех раз. Хранение результатов поверки в базе данных облегчает и ускоряет поиск необходимой информации и упрощает формирование протоколов и свидетельств. Автоматизация расчета погрешностей средств измерений позволяет максимально исключить ошибки при поверке и повысить достоверность результатов поверки.

Итогом применения такого инструмента является повышение производительности метрологической службы и повышение качества поверки средств измерений.

Актуальность проблемы автоматизации поверки и возможности её решения с помощью современного ПО

Современные темпы экономического развития предполагают постоянное наращивание производительности и повышения качества выпускаемой продукции и оказываемых услуг. Следование этой тенденции гарантирует успешное развитие любой отрасли. Конкуренция на международном рынке вынуждает производителей находить все новые и более качественные решения актуальных проблем. Это позволяет им оставаться конкурентоспособными.

Применяемое в различных отраслях производства оборудование, так или иначе, связано с проведением измерений необходимых параметров и величин. Полученные результаты измерений напрямую задействованы в производственном процессе. От средств измерений (СИ) и грамотности их применения напрямую зависит качество выпускаемой продукции.

Гарантией того, что применяемые СИ удовлетворяют заявленным метрологическим характеристикам, является его эффективно проведенная поверка. Техническую сторону этого вопроса редко обсуждают.

Современные производители СИ предлагают приборы, способные решать различные измерительные задачи и обладающие возможностью автоматического управления. Можно заметить, что сейчас большая часть документации того или иного СИ описывает возможные варианты программирования и автоматизированного управления устройством. Современная эталонная база также имеет возможность автоматического управления посредством компьютера.

Усложнение выпускаемых приборов приводит к усложнению методик поверки, и, как следствие, увеличению времени, затрачиваемого на поверку из-за большого числа параметров. Увеличивается утомляемость поверителя, что отрицательно сказывается на качестве работы.

В процессе деятельности метрологической лаборатории возникает необходимость хранить большие количества информации в бумажном виде (протоколы, свидетельства). Даже при систематизированном подходе по их хранению поиск необходимых документов в архиве бывает затруднен и не всегда оперативен.

Перечисленные проблемы можно считать прямыми предпосылками для внедрения автоматизации поверочной деятельности метрологических служб, как юридических лиц, так и государственных органов, занимающихся поверкой СИ. Важно отметить, что под автоматизацией поверочной деятельности следует понимать не только автоматизацию оформления результатов (протоколы поверки, свидетельства о поверке и т.д.), но и сам процесс поверки средств измерения – техническая сторона процесса.

Большинство поверочных лабораторий оснащено эталонной базой фирмы Fluke. Продукция этого производителя уже давно зарекомендовала себя на рынке измерительного оборудования и не нуждается в представлении. Однако, параллельно с измерительной техникой, вот уже на протяжении более двадцати лет компания Fluke успешно разрабатывает программный комплекс «Met/Cal». Основная задача этого продукта - максимально (насколько это возможно) автоматизировать процесс поверки СИ.

¹ Кандидат технических наук, инженер метролог.

Правильно настроив приложения и имея в арсенале процедуры автоматизированной поверки поверитель может ограничиться следующими этапами работы:

- а) Регистрация СИ в общей базе данных,
- б) Выполнение процедуры автоматизированной поверки,
- в) Печать протокола и свидетельства о поверке или извещения о непригодности СИ.

В зависимости от типа поверяемого СИ процедура поверки может быть выполнена полностью автоматически: поверитель осуществляет только коммутацию проводов согласно измерительной схеме (рисунки 1, 2).



Рисунок 1 - Пример графической схемы, иллюстрирующей способ коммутации СИ и необходимую оснастку

The screenshot shows the 'Test Results' window with the following data:

No.	Range	UUT	Indicated	System Actual	C Modifier	Error	%Tol
1		Внешний осмотр					PASS
2		Опробование прибора					PASS
1		Самотестирование мультиметра					PASS
Версия программного обеспечения A.01.09-02.25-01.09-00.35-01-01							
===DCV===							
1	100		99.99877357mV	100mV	N	-12.2 ppm	14
2	100		-99.99977453mV	-100mV	N	-2.25 ppm	3
3	1		999.994501mV	1V	N	-5.49 ppm	12
4	1		-1.0000029V	-1V	N	2.90 ppm	6
5	10		4.00001475V	4V	N	3.68 ppm	8
6	10		9.99997699V	10V	N	-2.30 ppm	6
7	10		-9.99997067V	-10V	N	-2.93 ppm	7
8	100		100.00102V	100V	N	10.2 ppm	20
9	100		-100.001039V	-100V	N	10.3 ppm	20
10	1000		1.00000373kV	1kV	N	3.73 ppm	7

Рисунок 2 - Ход выполнения поверки СИ (полностью автоматическая поверка)

Поверка может также осуществляться в полуавтоматическом режиме: например, при поверке ручного мультиметра поверитель будет переключать вручную режимы работы СИ, вводить с клавиатуры его показания, осуществлять коммутацию с эталоном. Но работа эталона и формирование протокола поверки будут выполняться автоматически (рисунок 3).

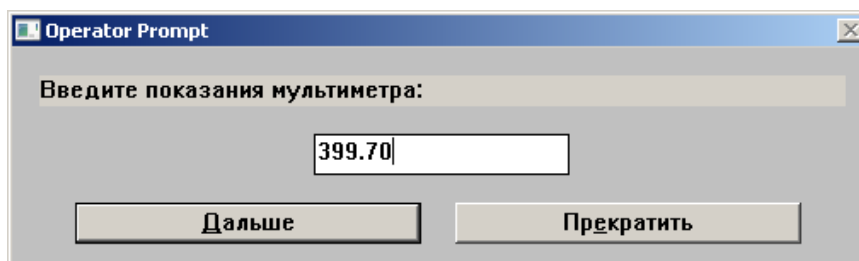


Рисунок 3 - Ввод с клавиатуры показаний поверяемого СИ (полуавтоматическая поверка)

При проверке тех или иных СИ могут возникать проблемы, связанные с процессом проверки, это могут быть специфические настройки работы СИ, уникальная оснастка, применяемая при проверке и т.д. Если не принимать их во внимание, то прибор может быть ошибочно забракован. Такие нюансы могут быть указаны в методике проверки или же просто выявлены в процессе работы поверителя.

В результате поверитель должен держать в голове множество сведений. Если они нигде не сохранены, тогда каждый раз перед проверкой необходимо заново изучать методику проверки и тратить множество времени на выявление технических нюансов. В худшем случае, если у поверителя не хватило времени или терпения, исправный прибор может быть забракован.

Этого можно избежать. Если посмотреть на любую методику проверки, то можно увидеть, что это последовательность действий или алгоритм. Следовательно, его выполнение можно автоматизировать.

Процедуры автоматизированной проверки не только ускоряют процесс проверки и повышают его качество, но и позволяют фиксировать все технические тонкости процесса. Поверителю наглядно демонстрируется: схема подключения СИ при проверке, необходимая оснастка для корректной сборки измерительной схемы, режимы работы приборов во время измерений. Все это осуществляется с помощью графических схем в качестве иллюстраций и простых текстовых сообщений (рисунок 3). Таким образом, накопленный опыт лаборатории не останется в качестве конспекта на полке, а будет реально применяться в повседневной практике.

Структура программного обеспечения Fluke Met/Cal

Программный комплекс Fluke Met/Cal включает в себя (рисунок 4):

- базу данных Met/Base
- средство управления базой данных Met/Track;
- среду разработки процедур автоматизированной проверки Met/Cal Editor;
- программу, реализующую выполнение процедур автоматизированной проверки Met/Cal Run/Time;
- инструмент формирования отчетов Crystal Reports.

База данных Met/Base

Структура базы данных может быть адаптирована практически под любые требования метрологической службы. Это достигается за счет возможности создания дополнительных пользовательских таблиц, которые могут содержать уникальную информацию учитывающую специфику конкретной организации.

Met/Track

Программа позволяет вести учет поступающих в проверку СИ (карточка СИ, записи о проверке/калибровке, запись о клиенте, запись о сервисном обслуживании, местоположении СИ).

Met/Cal Editor

Программа дает возможность пользователю создавать процедуры проверки и обеспечивает:

- возможность диалога с поверителем во время выполнения автоматизированной процедуры (диалоговые окна, схемы подключения, звуковое оповещение);
- возможность разработки уникальных процедур проверки под конкретные задачи и комплектацию оборудования (создание нестандартных стендов);
- считывание показаний с поверяемого СИ автоматически или же путем ввода с клавиатуры (зависит от СИ);
- возможность закрытия кода готовых процедур от несанкционированного изменения;
- большое количество инструментов языка написания процедур; с их помощью можно решать самые разнообразные и сложные задачи даже при наличии школьного уровня знаний о программировании.



Рисунок 4 - Структура программного обеспечения Fluke Met/Cal

Met/Cal RunTime

Программа обеспечивает взаимодействие компьютера и подключенных устройств, учитывает характеристики эталонной базы, осуществляет протоколирование результатов поверки и их последующую запись в базу данных.

Модуль Crystal Reports

Вся информация в базе данных Met/Base хранится в виде связанных таблиц. Для представления информации в виде, удобном для анализа и отчетов, создан модуль Crystal Reports.

Этот инструмент позволяет, работая с одной базой данных, создавать различные шаблоны отчетов. Шаблон представляет собой инструкцию, в которой содержится алгоритм отбора данных, необходимых пользователю. Помимо простого представления данных, шаблон может быть интеллектуальным, т.е. в зависимости от содержащейся в нем информации он может менять свое оформление. Простейший пример: если по результатам поверки прибор годен, в конце протокола будет написано «Вывод: годен. Выдано свидетельство о поверке №...», в противном случае будет указано «Вывод: негоден. Выдано извещение о непригодности №...». Для этого достаточно сделать один шаблон протокола и указать необходимые условия.

Пользователь может:

- переформить имеющийся шаблон без необходимости создавать новый;
- создать уникальные шаблоны с нуля, с учетом новых пользовательских таблиц;
- встроенный в шаблоны язык программирования позволяет автоматически менять содержание отчета в зависимости от его содержания;
- импортировать полученные отчеты в различные типы файлов (*.pdf, *.rtf, *.csv, Microsoft Excel, Microsoft Word) и редактировать в дальнейшем.

Типовой протокол калибровки MET/CAL содержит полную информацию о состоянии процесса, подробностях испытания, достоверности результатов измерений, применяемых эталонах и вспомогательном оборудовании.

Прослеживаемость от СИ к эталону и от эталона к СИ

Программное обеспечение Met/Cal имеет уже встроенные отчеты, с помощью которых становится возможным получить информацию о прослеживаемости в направлении от эталона к СИ и в обратном направлении. С помощью этих отчетов возможно проследить всю цепочку поверки СИ, и, если требуется, выявить, на каком этапе была допущена ошибка или же имела место неисправность эталонной базы. Шаблоны этих отчетов легко могут быть отредактированы (рисунки 5, 6).

Прямой отчет о прослеживаемости.

Отчет о прослеживаемости для прибора

Номер в базе данных: 116
Производитель: KEYSIGHT
Модель: 34410A
Описание: цифровой мультиметр
Заводской номер: MY53011927
Дата и время поверки: 01.07.2015 @ 10:03:05

Применяемые эталоны

====>> 01 Fluke 5522A калибратор , Дата поверки: 25.03.2015 13:16:52
====>> 02 Fluke 8508A цифровой мультиметр , Дата поверки: 06.05.2015 13:17:09

Рисунок 5 - Отчет прослеживаемости от СИ до эталона (прямая трассировка)

Обратный отчет о прослеживаемости.

Используемый стандарт

Номер в базе данных: 01
Производитель: Fluke
Модель: 5522A
Описание: калибратор
Заводской номер: 2079902

Приборы поверенные с использованием эталона

====>> 81 KEYSIGHT 34411A цифровой мультиметр , Дата поверки: 08.06.2015 9:48:16
====>> 82 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 08.06.2015 11:36:11
====>> 83 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 08.06.2015 12:23:58
====>> 84 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 08.06.2015 14:45:47
====>> 85 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 08.06.2015 15:36:49
====>> 86 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 09.06.2015 8:37:08
====>> 87 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 09.06.2015 10:47:35
====>> 88 ПРОФИГРУПП ОММЕГА 115 цифровой мультиметр , Дата поверки: 09.06.2015 11:48:20
====>> 89 EXTECH EX530 цифровой мультиметр , Дата поверки: 09.06.2015 12:27:24

Рисунок 6 - Отчет прослеживаемости от эталона до СИ (обратная трассировка)

Оценка запаса точности эталона при поверке/калибровке

Благодаря тому, что ПО Fluke Met/Cal содержит в себе информацию о точностных характеристиках большинства эталонов таких фирм как KEYSIGHT (HP, Agilent), FLUKE, Philips, Tektronix и т.д., становится возможным в процессе поверки оценивать запас по точности эталонной базы для каждой конкретной поверяемой точки. Этот параметр носит название TUR (Test Uncertainty Ratio – отношение погрешностей теста), он представляет из себя соотношение:

$$TUR = \frac{\text{Погрешность поверяемого СИ}}{\text{Погрешность эталона}}$$

Это соотношение вычисляется для каждой поверяемой точки.

Взяв на вооружение этот параметр, метролог получает наглядный инструмент оценки имеющейся эталонной базы. К примеру, если указанный в методике рекомендуемый эталон превосходит поверяемое СИ по точности только в два раза (TUR=2), то метролог может решить для себя: согласиться с методикой поверки, где этот эталон указан как рекомендуемый, и оставить его; либо воспользоваться другими эталонами, которые увеличат запас по точности, например до трех (TUR=3). Естественно, все вычисления параметра TUR производятся программой автоматически в процессе поверки.

Возможности подключения поверяемых приборов к компьютеру и организации рабочих мест поверителей

Для коммутации эталонов и СИ с компьютером могут использоваться последовательные порты ПК (RS-232), USB (через драйвер VISA) и GPIB.

Интерфейс GPIB позволяет подключить до 15-ти устройств к одной плате компьютера при максимальной общей длине цепочки кабелей 20 м. Программное обеспечение «Fluke MET/CAL» работает с контроллерами шины GPIB, разработанными фирмой National Instruments.

Естественно, что полностью автоматическая поверка СИ возможна только в том случае, когда каждый из приборов, участвующий в процессе поверки (эталон и поверяемое СИ) имеет интерфейс для подключения к компьютеру и документированную систему команд.

Кроме того, специалисты метрологической службы компании ДИПОЛЬ разработали и внедрили в свой рабочий процесс систему машинного зрения, с помощью которой стало возможным поверять в автоматическом режиме ручные цифровые мультиметры. Поверитель осуществляет только коммутацию эталона и мультиметра согласно измерительной схеме и переключает режимы работы прибора. Считывание показаний с прибора осуществляется автоматически с помощью веб-камеры. Считанные показания обрабатываются с помощью Fluke Met/Cal и заносятся в протокол. Схема работы системы машинного зрения представлена на рисунке 7.



Рисунок 7 - Система машинного зрения для распознавания показаний цифровых мультиметров

Данная система вместе с программным обеспечением прошла тестовые испытания более чем на двухстах поверяемых приборах и зарекомендовала себя как надежный и эффективный инструмент автоматизации поверки СИ.

Использование программным обеспечением «Fluke MET/CAL» базы данных в своей архитектуре дает возможность формировать локальную компьютерную сеть из рабочих мест поверителей. При этом поверители могут одновременно работать с единым массивом данных парка СИ (рисунок 8).

Инструменты администрирования базы данных позволяют разграничить права и области действия пользователей (поверителей). К примеру, опытный поверитель может заниматься написанием процедур автоматизированной поверки, а менее опытные поверители могут выполнять только ввод данных о приборах в базу и осуществлять поверку. При этом они не имеют доступа к коду процедур автоматизированной поверки. Возможно ограничение прав пользователей вплоть до простого просмотра данных базы, без возможности редактирования.

Программное обеспечение Fluke MET/CAL выполняет требования по единству измерений и отчетности, устанавливаемые стандартами качества и аккредитации, включая ISO/IEC 17025, ISO 9000, QS 9000, EN 45000, ANSI Z540 без необходимости написания собственных программ, настройки собственных баз данных и документирования системы.

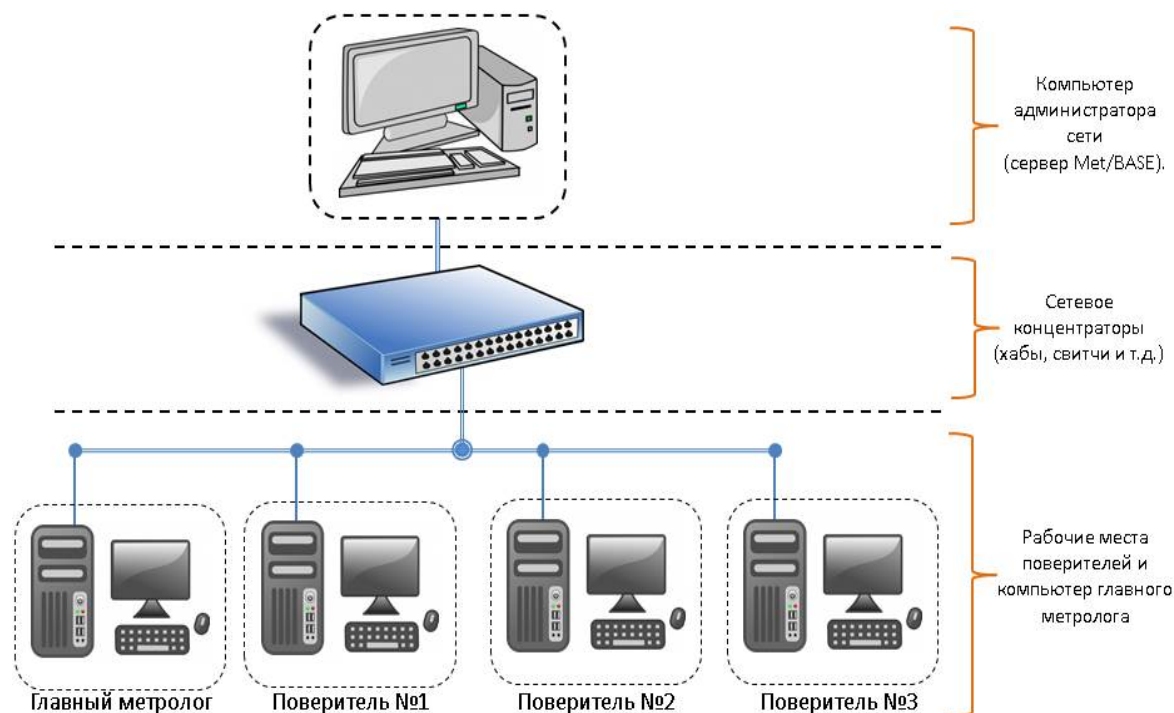


Рисунок 8 - Пример организации сети для работы Fluke Met/Cal

Заключение

Ориентация программного продукта «Fluke Met/Cal» на ГОСТ ИСО/МЭК 17025 является очень актуальной, так как новые требования к компетентности аккредитованных лиц, выполняющих поверку и калибровку средств измерений, другие метрологические работы, базируется на требованиях этого международного стандарта.

Приобретенный сотрудниками метрологической службы «ДИПОЛЬ» опыт применения данного продукта в поверочной деятельности и возможность тесного взаимодействия с изготовителем программного продукта позволяют говорить о перспективах распространения опыта и обучения сотрудников других предприятий.

Группа компаний «Диполь», которая является официальным дистрибьютором FLUKE, создала программу обучения персонала метрологических служб предприятий по использованию программного продукта FLUKE MET/CAL и приглашает принять участие в освоении этой современной технологии.

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ АТОМНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ И МОРСКОЙ СРЕДЫ

Н. Л. Кучин,

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», СПбГУ, С.-Петербург, РФ

А. И. Лайкин, Ю. В. Михеев

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», С.-Петербург, РФ

Аннотация

Ключевые слова: погружные гамма спектрометры, радионуклиды, стенд, радиоэкология

В работе приведены сравнительные характеристики погружных радиометрических систем для решения задач морской радиоэкологии. Предложен алгоритм обработки спектрометрической информации при калибровке (поверке) погружных гамма спектрометров и радиометров жидкости на основе полученных аппаратурных спектров основных радионуклидов равномерно распределенных в бассейнах метрологического стенда «Град-М». Показаны примеры использования погружных гамма спектрометров и радиометров жидкости для решения многообразных задач морского радиоэкологического мониторинга.

Источниками поступления радионуклидов в водную среду могут являться сбросы атомных электростанций и комбинатов по переработке ядерного топлива, аварийные ситуации с хранилищами радиоактивных отходов, отработавших активных зон и ядерного оружия, аварийные ситуации с судами, перевозящими радиоактивные отходы и другие радиоактивные материалы, места базирования и аварийного затопления атомных кораблей и судов.

В последнее время становится все более актуальной проблема экологической реабилитации акваторий арктических и северных морей, в которых находятся затопленные или аварийные ядерно и радиационно-опасные объекты, представляющие собой потенциальные источники выхода радиоактивных веществ в водную среду.

Решение проблемы экологической реабилитации указанных акваторий, как правило, связано с применением оперативных методов подводного радиационного мониторинга, среди которых определяющая роль отводится аппаратурным комплексам на основе погружных гамма спектрометров. Последние, в отличие от методов пробоотбора, которые основаны на длительном концентрировании измеряемых элементов с использованием радиохимических и сорбционных методик, предполагают прямые дистанционные методы измерений в режиме *in situ* для определения естественных и техногенных радионуклидов в морской среде.

Среди многообразия радиометрических систем реально используемыми детекторами в погружных спектрометрах являются детекторы на основе скintилляторов $NaI(Tl)$ и $CsI(Tl)$, BGO , $LaBr(Ce)$ и полупроводниковых детекторов из особо чистого германия ($ОЧГ$). Последние имеют лучшее энергетическое разрешение, но требуют охлаждения детектора во время его работы и отличаются относительно высокой стоимостью. Поэтому, доминирующее положение в технике морских радиационных измерений занимают скintилляционные счетчики с неорганическими кристаллами [1]. Наибольшее распространение для решения задач радиоэкологии акваторий и измерениях объемной активности гамма излучающих радионуклидов в водной среде получили детекторы на основе кристаллов йодистого натрия или цезия активированных таллием $NaI(Tl)$, $CsI(Tl)$ и германата висмута BGO [2-4].

Детекторы на основе $CsI(Tl)$ обладают примерно такими же характеристиками, что и детекторы $NaI(Tl)$, как по чувствительности, так и по разрешению. Кроме того, они не гигроскопичны более устойчивы к механической обработке и температурным перепадам. Меньшее применение этих кристаллов для радиоэкологических измерений связано с наличием обычно в них небольшого количества примеси радионуклида $Cs-137$, измерение которого в основном и необходимо в водной среде. Наличие примеси увеличивает минимально измеряемую активность и снижает точность измерений.

Среди достоинств детекторов BGO - высокая плотность вещества в чувствительном объеме детектора, относительно небольшое время реакции на частицу или квант, вызвавших скintилляцию, химическая и радиационная устойчивость, возможность выбора приемлемых размеров и свойств скintиллятора (таблица1).

Таблица 1 - Основные характеристики неорганических сцинтилляторов

Характеристики	Тип сцинтиллятора		
	<i>NaI(Tl)</i>	<i>CsI(Tl)</i>	<i>BGO</i>
Плотность, г/см ³	3,67	4,51	7,13
Эфф. атомный номер, $Z_{эфф}$	50	54	74
Конверсионная эффективность для электронов, %	8	6	0,8-1,3
Время высвечивания быстрой компоненты, мкс	0,25	0,7	0,35
Максимум спектра сцинтилляции, А	4100	5600	4800
Радиационная устойчивость	плохая	хорошая	хорошая
Гигроскопичность	да	нет	нет
Ударостойкость	плохая	удовл.	удовл.
Термическая устойчивость	плохая	хорошая	хорошая

Основные характеристики спектрометра включают измерительные и эксплуатационные параметры, среди которых, в первую очередь, выделяют эффективность регистрации, энергетическое и временное разрешение, а также размеры детектора. При этом соответствие аппаратного спектра истинному спектру излучения, определяемому схемой распада радионуклидов, существенно зависит от энергии регистрируемых гамма – квантов и достигается при выборе конструктивно оптимальных решений для детектора и геометрических условий измерений.

Амплитудное распределение сцинтилляционного спектрометра, соответствующее моноэнергетическому гамма-излучению, состоит из ярко выраженного пика полного поглощения (фотопика), описываемого функцией Гаусса, и непрерывного комптоновского распределения. Однако с увеличением энергии гамма - квантов вероятность фотоэффекта резко уменьшается, более плавно спадает вероятность комптоновского рассеяния, а начиная с энергии 1.02 МэВ, возрастает вероятность образования пар. Отношение числа импульсов в фотопике к числу импульсов в комптоновском распределении уменьшается с ростом энергии гамма излучения. При этом сечение указанных выше процессов взаимодействия гамма-излучения со сцинтиллятором в значительной мере определяет форму аппаратного спектра сцинтилляционного спектрометра.

Анализ литературных данных показывает, что использование в блоках детектирования сцинтилляторов *BGO*, отличающихся от широко используемых в настоящее время *NaI(Tl)* и *CsI(Tl)* высокой плотностью (7,13 г/см³) и атомным номером, позволяет существенно повысить чувствительность блоков детектирования, особенно при больших энергиях. Кристаллы *BGO* обладают по сравнению с *NaI(Tl)* более высокой поглощающей способностью, что позволяет снизить объем детектора на порядок.

На рис.1 приведены сравнительные эффективности регистрации гамма-излучения в пике полного поглощения (фотопик) в зависимости от энергии излучения для детекторов на основе кристаллов *BGO* и *NaI(Tl)* и размерами 38 x 38 мм [3]. Анализ данных показывает, что использование оксидных сцинтилляторов типа *BGO* особенно эффективно на высоких энергиях, где выигрыш в эффективности регистрации в фотопике достигает от 5 до 8 раз. При этом энергетическое разрешение *BGO* значительно ниже.

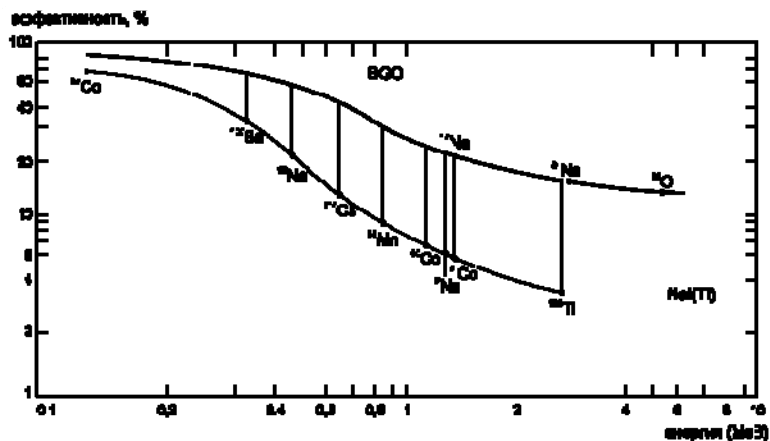
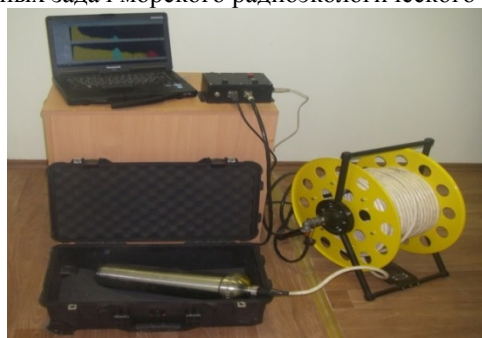


Рисунок 1 - Эффективности регистрации гамма-излучения в зависимости от энергии для *NaI(Tl)* и *BGO* размером 38x38 мм

Особое внимание в спектрометрии ионизирующих излучений отведено детекторам на основе "высокотемпературного" полупроводника малого объема $CdZnTe$, способного работать при температуре окружающей среды, а также детекторам на основе $LaBr(Ce)$, имеющих энергетическое разрешение, близкое к разрешению полупроводниковых детекторов (2,5-3,5 % на энергии 662 кэВ) и объем до 76x76 мм. Но их применение является оправданным только для контроля обогащения делящихся материалов, а также анализа законодательных или аварийных сбросов радиоактивных веществ в гидрографическую сеть и водоемы - охладители современных АЭС, когда существуют значительные потоки гамма - квантов и необходимо относительно высокое энергетическое разрешение для разделения близких линий гамма - излучения.

Отличительной особенностью любого погружного спектрометра являются конструктивные особенности его герметичной капсулы, форма и материал которой влияют на чувствительность детектора к ионизирующему излучению, а также прочностные, коррозионные и массогабаритные характеристики самого погружного спектрометра. При этом материал капсулы не должен содержать примесей естественных и техногенных радионуклидов, присутствие которых может сказаться на минимально обнаружимой активности спектрометра. В погружных спектрометрах традиционно используют титан, углепластик или металлокерамику и корпус капсулы в форме цилиндра с полусферическим торцом в детекторной части в целях уменьшения потерь гамма излучения.

Примеры использования погружных гамма спектрометров и радиометров жидкости для решения многообразных задач морского радиоэкологического мониторинга приведены на рис.2.



ЭКО-10



ЭКО-7 («Семен Дежнев»)



Детекторы РЖГ-15с на борту баржи "Гигант-4"



ЭКО-5 на глубоководном аппарате «Мир»



Комплекс «Варяг –ЧС»



Комплекс АПКК

Рисунок 2 - Погружные спектрометрические системы и радиометры жидкости для задач подводного радиационного мониторинга

Метрологическое обеспечение погружной гамма-спектрометрии

Определяющим фактором при проведении обследований морских акваторий с использованием погружных спектрометров является калибровка сцинтилляционных детекторов в части определения чувствительности регистрации объемной активности водных сред для отдельных радионуклидов в заданных интервалах аппаратного спектра или энергетического диапазона измерений. Для этих целей ФГУП «Крыловский государственный научный центр» располагает аттестованным стендом «Град-М», исследования на котором призваны обеспечить корректность и воспроизводимость результатов измерений вплоть до сверхмалых уровней радиоактивности в океане.

Стенд «Град-М» (рис. 3 -5) предназначен для выполнения калибровки (поверки) погружных радиометрических систем и изделий морской техники подобного назначения, применяемых при радиоэкологических обследованиях акваторий и других измерениях величины объемной активности гамма-излучающих радионуклидов в водной среде [5,6].

В состав стенда входят:

- две стальные и нержавеющие цилиндрические емкости объемом 48 и 3,5 м³ соответственно с общей площадкой обслуживания, гидротехнические коммуникации и электроталь грузоподъемностью 500 кг;
- вспомогательная емкость объемом 0,2 м³ для дезактивации оборудования;
- два воздушных компрессора для перемешивания растворов;
- устройства и оборудование для приготовления образцовых рабочих растворов радиоактивных изотопов;
- измерительная аппаратура, вычислительная техника и программное обеспечение.



Рисунок 3 - Стенд «Град-М»

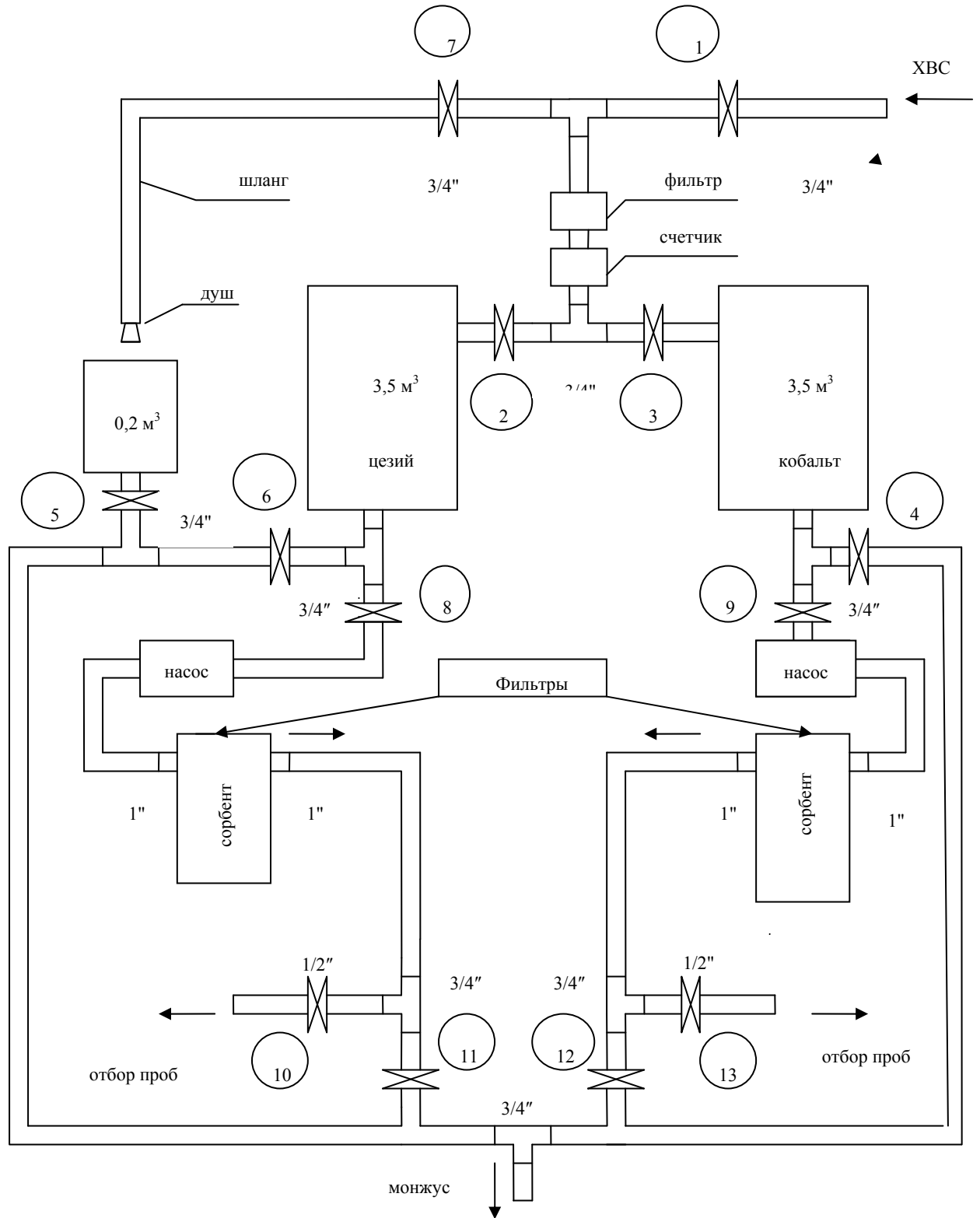


Рисунок 4 - Структурная схема стенда с емкостями объемом 3,5 и 0,2 м³

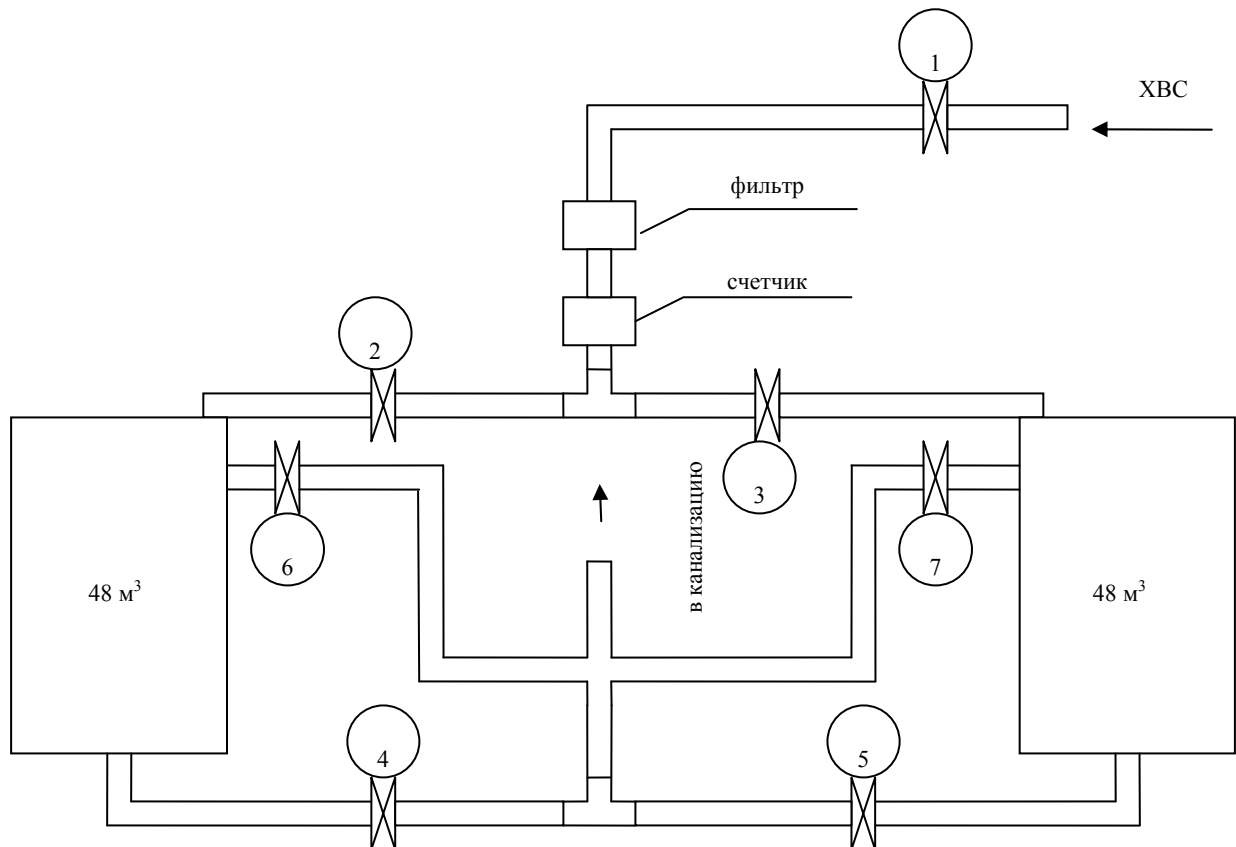


Рисунок 5 - Структурная схема стенда с емкостями объемом 48 м³

Стенд «Град-М» позволяет проводить калибровку (поверку) нестандартизированных и внесенных в госреестр средств измерений (СИ), имеющих массу до 150 кг и максимальную длину не более 3000 мм.

Система гидротехнических коммуникаций предназначена для контролируемого заполнения емкостей стенда технической (водопроводной) водой и слива отработавших растворов в спецканализацию.

Предусмотрена возможность перемешивания образцовых растворов радионуклидов в емкостях стенда сжатым воздухом от компрессора и прокачки насосом при их замене через фильтры с промышленным сорбентом «ФЕЖЕЛ®», являющимся основой технологии очистки промышленных растворов от радионуклидов. Сорбент относится к классу практически нетоксичных, малоопасных соединений. Коэффициент очистки от радионуклидов достигает 200000. Ресурс работы сорбента от 1000 до 10000 м³.

Измерительная аппаратура стенда обеспечивает непрерывный контроль объемной активности рабочих образцовых растворов и дозиметрический контроль, включая средства оперативной диагностики.

Технические характеристики стенда:

- диапазон воспроизведения объемной активности рабочих образцовых растворов от 102 до 106 Бк/м³;
- суммарная величина активности используемых при измерениях радионуклидов от 105 до 107 Бк;
- время заполнения емкостей стенда водопроводной водой и слива отработавших рабочих образцовых растворов составляет не более 16 часов;
- пределы основной относительной погрешности измерений удельной активности растворов и дозиметрических параметров $\pm 30\%$.

Дополнительные относительные погрешности:

- при изменении температуры окружающей среды от 10 до +30 °С – 1 %/о С;
- при изменении напряжения питания в пределах от 187 до 242 В – + 3 %;
- за 24 часа непрерывной работы в автоматическом режиме – + 15 %.

Длительность установления рабочего режима не более 30 мин;

непрерывная продолжительность работы аппаратуры стенда в автоматическом режиме не менее 24 ч при температуре окружающего воздуха от плюс 10 до 30 °С, атмосферном давлении 632–802 мм рт. ст., относительной влажности воздуха до 75 % при температуре 30 °С;

Длина кабельных линий связи детекторов исследуемых СИ с оборудованием стенда не более 100 м.

Методика измерений

С целью обеспечения калибровки (поверки) погружных гамма спектрометров и радиометров жидкости, применяемых при радиоэкологических обследованиях акваторий, сотрудниками Крыловского центра совместно со специалистами «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» была разработана методика измерений и предложен алгоритм обработки спектрометрической информации.

По результатам испытаний погружных гамма спектрометров определялась чувствительность регистрации объемной активности отдельных радионуклидов (Na-24, Cl-38, Cs-137, Co-60) в заданных интервалах аппаратурного спектра или энергетического диапазона измерений.

Для проведения указанных выше работ в бассейнах стенда приготавливают образцовый рабочий раствор заданного радионуклида, аттестованного в качестве эталона на специальных установках «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». При этом малые баки стенда объемом 3,5 м³ предназначены для калибровки погружных блоков детектирования по долгоживущим радионуклидам, таким как Cs-137 и Co-60, а емкости объемом 48 м³ – по радионуклидам с малым периодом полураспада, например Na-24 и Cl-38. Для обеспечения стабильности химического состояния и предотвращения адсорбции радионуклидов на стенках емкости стенда и на взвешенных частицах в водопроводную воду добавлялся неактивный носитель в виде раствора соответствующего радионуклида.

Алгоритм обработки спектрометрической информации заключается, как правило, в сравнение двух спектров «фон» и «эффект + фон» на основе статистических критериев в предположении пуассоновского распределения чисел отсчетов калибруемых (поверяемых) детекторов гамма излучения [7,8].

По результатам фоновой спектра (рис.6), в каждом i -том энергетическом диапазоне, в котором измеряется чувствительность детектора, определяют сумму зарегистрированных импульсов $N_{\phi i}$ и рассчитывают значение скоростей счета радиационного фона $n_{\phi i}$, с⁻¹, и их относительные статистические неопределенности $u_{\phi i}$, с⁻¹, по формулам:

$$n_{\phi i} = N_{\phi i} / t_{\phi}, \quad u_{\phi i} = \frac{1}{n_{\phi i}} \cdot \sqrt{N_{\phi i}} / t_{\phi},$$

где t_{ϕ} – время набора фоновой спектра, с.

По каждому j -му спектру, полученному от объемных источников (рис.7), в каждом i -том энергетическом диапазоне, в котором измеряется чувствительность детектора, рассчитывают сумму зарегистрированных импульсов N_{ji} и определяют значение скоростей счета n_{ji} , с⁻¹, по формуле:

$$n_{ji} = N_{ji} / t_j,$$

где t_j – время набора j -го спектра, с.

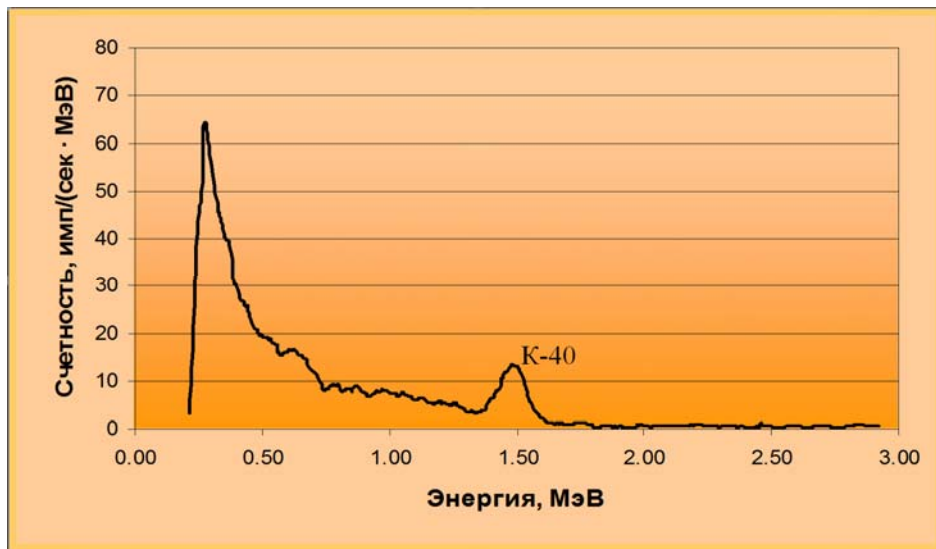


Рисунок 6 - Энергетический спектр фоновой гамма излучения в воде

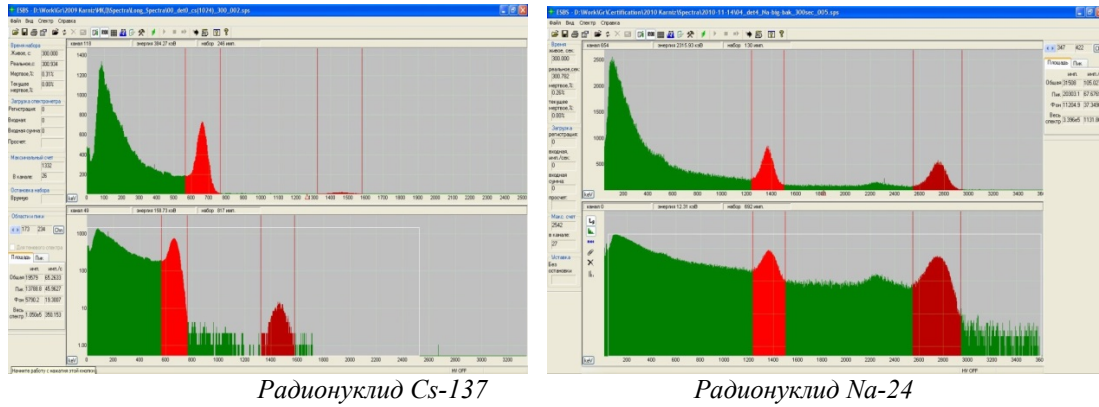


Рисунок 7 - Программное обеспечение и спектрометрический анализ

Чувствительность регистрации объемной активности радионуклида в каждом i -том энергетическом диапазоне ε_{ji} , $\text{с}^{-1}\text{Бк}^{-1}\text{м}^3$, по каждому j -му спектру рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon_{ji} = \frac{n_{ji} - n_{\phi i}}{a_j} \cdot K_j^{\text{расп}},$$

где a_j – объемная активность образцового раствора радионуклида в бассейне на момент начала j -го измерения, $\text{Бк}/\text{м}^3$;

$$a_j = \frac{a_{\text{исх}} \cdot m_0}{V} \cdot e^{-\frac{0.693 \cdot \tau_j}{T}},$$

$a_{\text{исх}}$ – величина удельной активности исходного раствора (Сертификат на эталонный образцовый раствор радионуклида, выдаваемого «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), $\text{Бк}/\text{г}$;

m_0 – масса исходного раствора радионуклида, вносимого в бассейн, г;

τ_j – промежуток времени между моментом аттестации исходного раствора и началом j -го измерения, с;

V – объем воды в бассейне, м^3 ;

T – период полураспада радионуклида, с;

$K_j^{\text{расп}}$ – коэффициент, учитывающий распад нуклида за время измерения j -го спектра

$$K_j^{\text{расп}} = \frac{0.693 \cdot t_j}{1 - e^{-\frac{T}{0.693 \cdot t_j}}}.$$

Используя приведенные выше выражения можно определить средние значения чувствительности регистрации объемной активности радионуклида в каждом i -том энергетическом диапазоне ε_i , $\text{с}^{-1}\text{Бк}^{-1}\text{м}^3$, и относительное СКО средних значений (u_i) по формулам:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{z} \sum_{j=1}^z \varepsilon_{ji}, \quad u_i = \frac{1}{\varepsilon_i} \sum_{j=1}^z \frac{(\varepsilon_{ji} - \varepsilon_i)^2}{z(z-1)}$$

Тогда относительная суммарная стандартная неопределенность измерения чувствительности u_{ci} , %, может быть рассчитана из соотношения:

$$u_{ci} = 100 \cdot \sqrt{u_i^2 + \left(\frac{u_{\phi i} \cdot n_{\phi i}}{\varepsilon_i} \cdot \frac{1}{z} \cdot \sum_{j=1}^z \frac{K_j^{\text{расп}}}{a_j} \right)^2 + \left(\frac{\delta a_{\text{исх}}}{200} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta m_0}{\sqrt{3} \cdot m_0} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta V}{\sqrt{3} \cdot V} \right)^2},$$

где $\delta a_{\text{исх}}$ – погрешность аттестации удельной активности исходного раствора (Сертификат на эталонный образцовый раствор радионуклида, выдаваемого «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»), %;

Δm_0 – основная погрешность весов, г;

ΔV – основная погрешность счетчика воды, м³.

По результатам определения чувствительности детектора находят значения нижнего и верхнего пределов измерения объемной активности радионуклида (диапазон измерений) для калибруемых (поверяемых) детекторов в каждом i -том энергетическом диапазоне a_i^{\min} и a_i^{\max} :

$$a_i^{\min} = \frac{3 \cdot \sqrt{n_{\Phi i}}}{\sqrt{t_i} \cdot \varepsilon_i} \quad a_i^{\max} = \frac{n_i^{\max}}{\varepsilon_i},$$

где n_i^{\max} – максимальная скорость счета в i -том энергетическом диапазоне измерения объемной активности радионуклидов, при которой «мертвое» время в процессе регистрации гамма излучения составляет не более 5 %.

Настоящая методика обеспечивает определение чувствительности регистрации объемной активности радионуклидов в воде с расширенной неопределенностью в пределах от 4 до 30 % при коэффициенте охвата $k=2$ [9].

По результатам метрологической аттестации погружных спектрометров и радиометров жидкости оформляется протокол испытаний с указанием чувствительности в заданном энергетическом диапазоне для определенного гамма - излучающего радионуклида, неопределенности (погрешности) измерения и диапазона измерения объемной активности с выдачей соответствующего сертификата калибровки или свидетельства о поверке.

Литература

1. **Матвеев В. В., Хазанов Б. И.** Приборы для измерения ионизирующих излучений. Москва, Атомиздат, 1972
2. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия. Под редакцией Зигбана К.. Вып.1, перевод с англ., Москва, Атомиздат, 1969
3. Scintillation Detectors. Проспект фирмы Harshaw, март 1992
4. **Salih M., et.all.** Расчет характеристик сцинтилляционного детектора из германата висмута методом Монте-Карло. Nuclear Instruments & Methods 221(1984) 378-384
5. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
6. ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений.
7. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Москва, Советское радио, 1975
8. **Бендат Дж., Пирсол А.** Прикладной анализ случайных данных. Москва, «Мир», 1989
9. ГОСТ 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

ИЗМЕРЕНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ ГИДРОФОНОВ НА ЛЧМ СИГНАЛАХ

Н. Г. Щерблюк¹

ФГУП ВНИИФТРИ, Менделеево, РФ, e-mail: shcherbluck@mail.ru

Аннотация

Ключевые слова: гидрофон, характеристика направленности

В работе описаны особенности измерения частотно-углового распределения гидрофона на непрерывном линейно частотно модулированном сигнале в незаглушенном бассейне. Приведён алгоритм очищения частотной характеристики гидрофона от ревербераций, вызванных отражениями от стенок бассейна. Экспериментальная проверка метода осуществлена на эталонной установке ГЭТ 55-2011 с применением высокочастотного гидрофона типа ГИ-800. Показано, что отклонение от результатов, полученных традиционным тонально-импульсным методом, не превышает 5%. Описано программное обеспечение, позволяющее визуализировать и изучать трёхмерную частотно-угловую диаграмму гидрофона.

Введение

В повышении качества изготовления современных гидроакустических преобразователей немаловажную роль играет метрологическое обеспечение производства. И речь идёт не только о первичной калибровке гидрофона, но и об измерении подробного частотно-углового распределения гидрофона с целью поиска оптимального направления приёма и излучения, либо исследования влияния технологического процесса на характеристику направленности гидрофона.

Традиционный метод измерения характеристик направленности гидрофона в незаглушенном бассейне основан на излучении тонального импульса и измерении импеданса пары излучатель-приёмник на дискретной частоте в зависимости от угла поворота приёмника относительно опорного направления на излучатель. Полученное таким способом частотно-угловое распределение гидрофона на разумном количестве дискретных частот не обладает достаточной степенью подробности, а процедура измерения занимает много времени.

В последнее время в связи с совершенствованием ЦАП-АЦП аппаратуры и развитием цифровых методов обработки сигналов широкое распространение получают методы измерения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователей, основанные на излучении непрерывных широкополосных сигналов, таких как шум или линейно частотно модулированный (ЛЧМ) сигналы. Например, применение ЛЧМ сигнала позволяет измерять частотные характеристики (ЧХ) пары в полосе сотни кГц с разрешением в 1 Гц и меньше. Кроме того, развиваются различные способы очищения измеренной ЧХ от влияния отражений от границ гидроакустического бассейна, среди которых можно выделить метод среднеквадратичного взвешенного усреднения (СКВУ) [1, 2] и обработка ЧХ с помощью кепстрального анализа [3].

Цели и задачи

Таким образом, эти факторы способствовали выработке следующих целей и задач данной работы:

- Программная реализация алгоритма измерения АЧХ пары излучатель-приёмник на ЛЧМ сигнале с последующим очищением от влияния ревербераций в кепстральной области. Кепстральная обработка была выбрана по причине того, что она позволяет дополнительно определять задержку между моментами излучения и прихода прямого сигнала, а, следовательно, контролировать расстояние между излучателем и приёмником, которое неизбежно меняется в процессе вращения приёмника. При измерении АЧХ на ЛЧМ сигнале задержку в приходе прямого сигнала необходимо знать для точного определения начальной частоты в измеренной АЧХ.

- Выбор оптимальных параметров ЛЧМ сигнала (скорость развертки, частота дискретизации, длительность реализации) для измерения частотно-углового распределения гидрофона на частотах до 1 МГц. Критерием оптимальности служила минимальность величины отклонения характеристики направленности, измеренной на тональном импульсе, от характеристики, полученной из частотно-углового распределения на соответствующей частоте.

- Создание программных средств визуализации двухмерной поверхности (частотно-углового распределения гидрофона) с возможностью интерактивного изменения параметров отображения поверхности.

¹ Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

Особенности измерения ЧХ на ЛЧМ сигнале

Напомним основные определения и особенности измерения частотной характеристики преобразователя на ЛЧМ сигнале. Назовём ЛЧМ сигналом волну, которая имеет временную зависимость $\sim e^{i\omega t}$, где частота $\omega = 2\pi f$ линейно модулирована:

$$f = f_0 + \frac{st}{2}, \quad s = \frac{\Delta F}{\Delta T}.$$

Здесь ΔF и f_0 – ширина и начало частотной полосы ЛЧМ сигнала соответственно, ΔT – длительность реализации, s – скорость развертки. Пример отклика гидрофона на ЛЧМ сигнал приведён на рисунке 1. Временная шкала связана с частотной по формуле

$$f_n = f_0 + \frac{s}{f_{\text{дискр}}}(n - n_0),$$

где n – номер отсчёта на временной шкале, n_0 – номер отсчёта начала прямого сигнала, а $f_{\text{дискр}}$ – частота дискретизации сигнала по времени. Как видно, начало частотной шкалы f_0 должно быть совмещено с началом прямого сигнала с гидрофона.

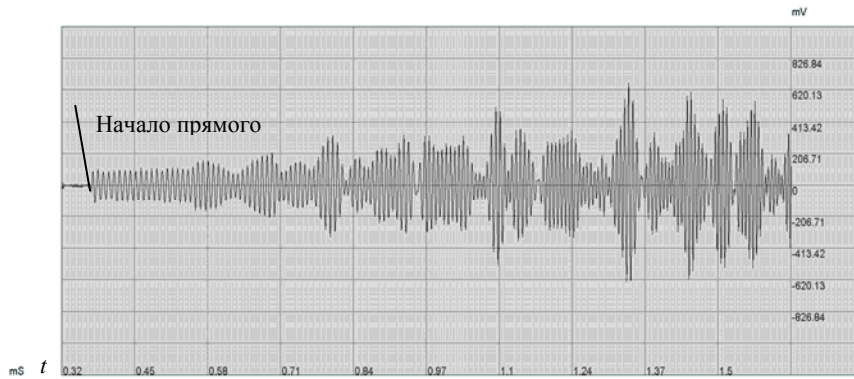


Рисунок 1 - Сигнал с гидрофона в поле звуковой ЛЧМ волны

Теперь, если провести процедуру построения огибающей к сигналу с гидрофона, например, с помощью

вычисления ортогонального сигнала методом Гильберта, то получится АЧХ пары излучатель-приёмник, искажённая реверберацией (см. рисунок 2).



Рисунок 2 - АЧХ пары излучатель-приёмник

Очищение ЧХ в кепстральной области

Рассмотрим алгоритм очищения частотной характеристики от отражений. Пусть $R(t)$ – принятый гидрофоном сигнал, $S(t)$ – излученный ЛЧМ сигнал. Вычислим их произведение

$$y(t) = R(t)S(t)$$

Поскольку каждый отражённый от плоской границы сигнал проявляется на ЧХ в виде гармонической модуляции, преобразование Фурье над $R(t)$, либо $y(t)$ даст картину распределения отражённых сигналов на шкале задержек, где каждое отражение от плоской границы представляет собой дельтообразный всплеск. Комплексную функцию $Y(\tau) = \text{FFT}[y(t)]$, где FFT означает быстрое преобразование Фурье (БПФ), назовём кепстром. Пример модуля кепстра $|Y(\tau)|$ изображён на рисунке 3.

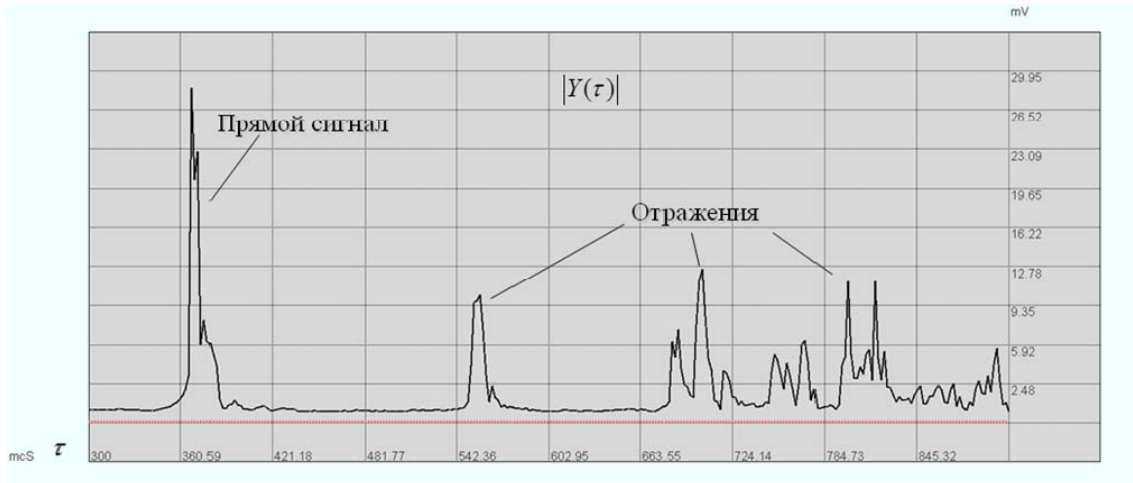


Рисунок 3 - АЧХ пары излучатель-приёмник

Шкала временных задержек τ определяется следующим образом: $\tau_n = 1/\Delta F \cdot n$, где n – номер отсчёта на шкале, ΔF – ширина частотной полосы ЛЧМ сигнала. При этом ноль на шкале τ соответствует моменту излучения. Положение максимума первого дельтообразного всплеска будет соответствовать временной задержке между прямым сигналом и моментом излучения. Таким образом, мы можем определить время прихода прямого сигнала и использовать это значение для совмещения начала частотной шкалы f_0 с началом прямого сигнала с гидрофона. Отметим, что если использовать для получения кепстра функцию $R(t)$, то мы получим картину распределения отражений на такой шкале, где временные задержки τ являются разницей между временами прихода отражений и прямого сигнала. В этом случае мы потеряем информацию о моменте прихода прямого сигнала.

Простейший способ обработки в кепстральной области для очищения ЧХ от ревербераций заключается в применении отдельно к мнимой и действительной частям кепстра $Y(\tau)$ прямоугольной оконной функции

$$W(\tau, \tau_1, \tau_2) = \begin{cases} 1, & \tau_1 < \tau < \tau_2; \\ 0, & \tau \leq \tau_1, \tau \geq \tau_2 \end{cases}$$

где τ_2 должно быть меньше времени прихода первого отражения. Заметим, что значения τ_1 и τ_2 могут быть разными для мнимой $\text{Im}Y(\tau)$ и действительной $\text{Re}Y(\tau)$ частей кепстра, и выбираются они так, чтобы функции $\text{Re}Y(\tau)$ и $\text{Im}Y(\tau)$ изменялись в окрестностях этих точек как можно медленнее. В итоге, после применения оконных функций мы получаем следующие функции $Y_1(\tau)$ и $Y_2(\tau)$:

$$Y_1(\tau) = W_1(\tau) \text{Re}Y(\tau), \quad Y_2(\tau) = W_2(\tau) \text{Im}Y(\tau).$$

Теперь необходимо вернуться обратно в частотную область, т.е. применить обратное БПФ к очищенному кепстру $Y_1(\tau) + iY_2(\tau)$

$$\tilde{y}(t \rightarrow f) = \text{FFT}^{-1}[Y_1(\tau) + iY_2(\tau)].$$

Заключительный шаг состоит в том, чтобы построить к $\tilde{y}(f)$ ортогональный сигнал $\tilde{y}_{\text{орт}}(f)$ с помощью преобразования Гильберта и вычислить очищенную АЧХ пары излучатель-приёмник

$$a(f) = \sqrt{\tilde{y}^2 + \tilde{y}_{\text{орт}}^2}.$$

В полученной ЧХ начало полосы f_0 нужно поместить в отсчёт с номером $n_1 f_{\text{дискр}} / \Delta F$, где n_1 - номер отсчёта, где находится максимум первого дельтообразного всплеска функции $|Y(\tau)|$. Заметим также, что из-за применения прямоугольного окна полученная ЧХ будет искажена характерной волнистостью, свойственной явлению Гиббса. Поэтому функцию $a(f)$ желательно сгладить сплайном.

Экспериментальная проверка

Целью экспериментальных исследований было установление оптимальных параметров излучаемого ЛЧМ сигнала путём сравнения характеристик направленности, полученных на тональном импульсе и на ЛЧМ сигнале, а также получение данных для построения трехмерной характеристики направленности гидрофона. Измерения проводились на эталонной установке ГЭТ55-2011. ГЭТ55-2011 является государственным первичным эталоном единицы звукового давления в воде [4]. Эталон представляет собой гидроакустический бассейн (размеры $1 \times 1 \times 1,5$ м) из прозрачного оргстекла с системой позиционирования калибруемых и вспомогательных гидрофонов. Излучательный и приёмный тракты реализованы на базе современных контрольно-измерительных приборов. Оборудование, входящее в состав эталона и измерительные процедуры управляются посредством персонального компьютера через специальное программное обеспечение. Основное применение эталона:

- – калибровка методом взаимности гидроакустических преобразователей по свободному полю с применением как тонального импульса, так и непрерывного сигнала;
- – измерение характеристик направленности гидроакустических преобразователей.

Для реализации измерительной процедуры и алгоритма кепстральной обработки было написано специальное программное обеспечение. В качестве излучателя использовался бескорпусной гидрофон на основе пьезоэлектрической сферы диаметром 5 мм. Приёмником служил высокочастотный гидрофон типа ГИ-800 с предусилителем. Было установлено, что при следующих параметрах ЛЧМ сигнала

$$\Delta F = 500 \text{ кГц}, \quad \Delta T = 10 \text{ мс}, \quad f_{\text{дискр}} = 10 \text{ МГц},$$

отличия результатов на ЛЧМ и на тоне не превышают 5 %.

Далее были проведены измерения диаграмм направленности гидрофона ГИ-800 тонально-импульсным методом на частотах 200, 300 и 500 кГц. Также было измерено частотно-угловое распределение гидрофона на ЛЧМ сигнале в частотной полосе от 100 до 600 кГц и построены сечения получившейся поверхности на частотах 200, 300 и 500 кГц. Результат сравнения двух методов измерения характеристик приведён на рисунке 4.

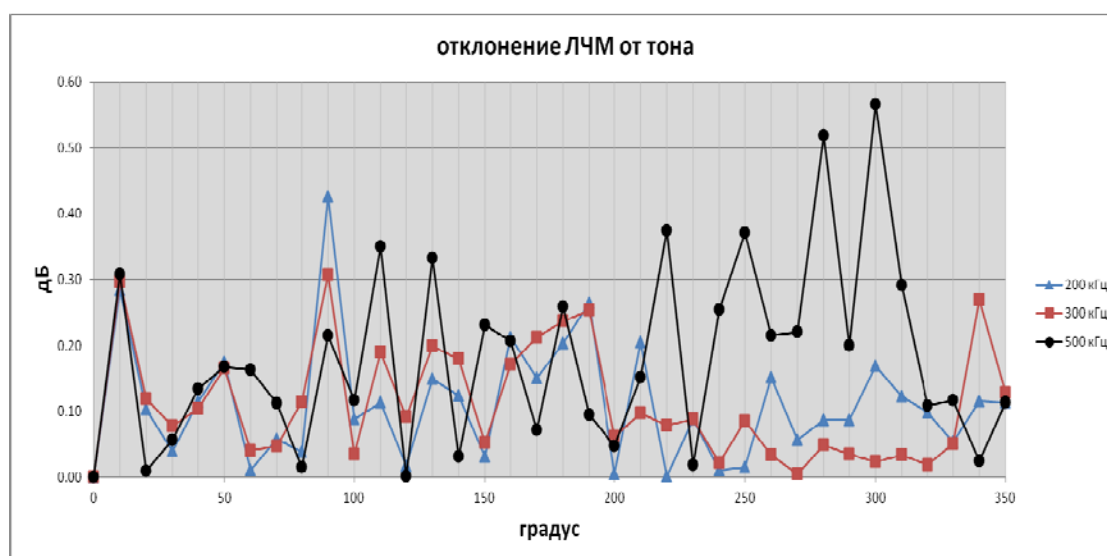


Рисунок 4 - Сравнение результатов на тональном и ЛЧМ сигналах

Отклонения в среднем составляют 0,2 дБ.

Трёхмерная визуализация

Частотно-угловое распределение представляет собой двухмерную поверхность с внутренними координатами частота-угол f, φ , вложенную в трёхмерное пространство как отображение $z = z(f, \varphi)$. Координату z обычно рассматривают как амплитуду сигнала с гидрофона на частоте f при угле φ , отнесённую к амплитуде на частоте f в условном опорном направлении. Для визуализации этой двумерной поверхности была создана программа, позволяющая триангулировать поверхность, т.е. представлять её сетью из треугольников (либо прямоугольников), образованных из массива углов поворота гидрофона и дискретного набора частот, выбранных из измеренной ЧХ с заданным шагом. Программа строит ортогональную проекцию триангулированной поверхности на экранную плоскость и удаляет невидимые грани и треугольники (прямоугольники). Кроме того, в программе реализовано интерактивное управление, позволяющее пользователю вращать поверхность относительно условного центра и изменять масштаб для детального изучения «долин», «впадин» и «холмов», например, с целью определения оптимального направления приёма. Пример визуализации частотно-углового распределения гидрофона ГИ-800 показан на рисунке 5. Также средствами программы возможно построение обычных плоских диаграмм угол-амплитуда на выбранной частоте.

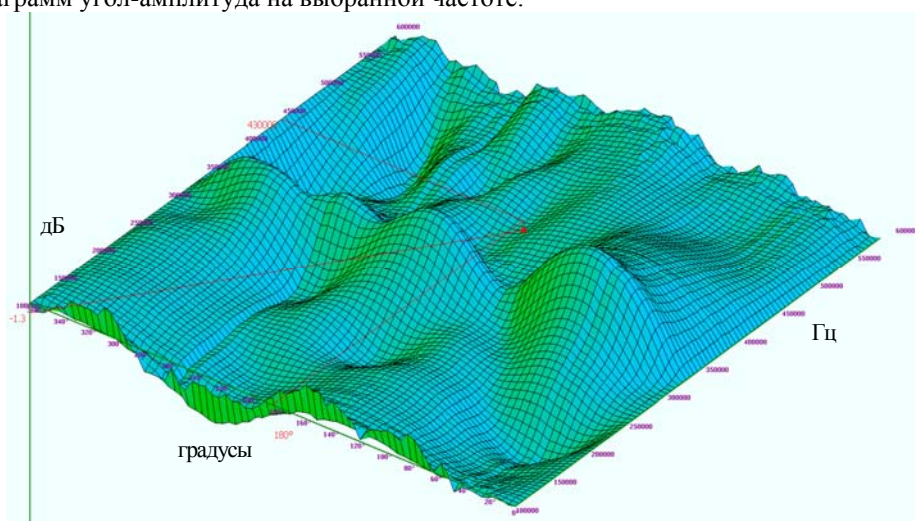


Рисунок 5 - Частотно-угловое распределение гидрофона

Выводы

1. Программно реализован алгоритм измерения АЧХ пары излучатель-приёмник на ЛЧМ сигнале с последующим подавлением реверберации в кепстральной области.
2. Оптимальная частотная полоса ЛЧМ сигнала при измерении АЧХ высокочастотных гидрофонов на аппаратуре эталона ГЭТ 55-2011 составляет 500 кГц при длительности ЛЧМ сигнала от 5 до 10 мс.
3. Отклонение значений амплитуд, измеренных на ЛЧМ сигнале, от измеренных на тональном импульсе в среднем составляет 0,2 дБ.
4. Реализована программа по визуализации трёхмерных характеристик направленности гидрофона с возможностью построения двумерных диаграмм – сечений поверхности на выбранной частоте.

Литература

1. Исаев, А. Е., Матвеев, А. Н. Два подхода к градуировке гидрофонов по полю при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне // Измерительная техника. – 2008. – № 12. – С. 47-51.
2. Исаев, А. Е., Матвеев, А. Н. Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберационном бассейне // Акустический журнал. – 2009. – Т.55. – № 6. – С. 727-736.
3. Randall, R. B. Frequency analysis. – Denmark: Bruel&Kjaer. – 1987. – 344 с.
4. Исаев, А. Е., Матвеев, А. Н., Некрич, Г. С., Некрич, С. Ф., Сильвестров, С. В., Черников, И. В., Щелкунов, А. И., Щерблюк, Н. Г. Государственный первичный специальный эталон звукового давления в водной среде // Измерительная техника. – 2013. – №7. – С. 3-6.

ГРАДУИРОВКА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ПРИЁМНИКОВ ПО ПОЛЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШУМОВОГО СИГНАЛА В ЛАБОРАТОРНОМ БАССЕЙНЕ

А. Е. Исаев¹, И. В. Черников²

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, РФ, e-mail: isaev@vniiftri.ru, iii@vniiftri.ru

Аннотация

Ключевые слова: гидроакустический приёмник, градуировка, шумовой сигнал

В работе представлены теоретическое обоснование и результаты исследований способа градуировки гидроакустических преобразователей по полю в контролируемых условиях лабораторного гидроакустического бассейна с использованием сигналов от подобных измеряемым в морских условиях. Предложенный и исследованный способ позволяет избавляться от влияния отражений от поверхностей бассейна на результаты измерений чувствительности гидроакустического приёмника, и, как следствие, использовать для градуировки сигналы, длительность которых не ограничена временем прихода первого отражения, что позволяет приблизить условия градуировки в бассейне к условиям измерений в натуральных условиях.

Введение

В настоящий момент, создать конструкцию гидроакустического приёмника столь совершенную как, например, шумомер в воздушной акустике, в подводной акустике пока не удаётся. Гидроакустические приёмники, используемые для измерений в натуральных условиях обладают частотной характеристикой чувствительности существенно неравномерной, в отличие от входящего в их состав измерительного гидрофона.

По данным Национальной Физической Лаборатории Великобритании [1] неравномерность частотной зависимости чувствительности (рисунок 1) и характеристик направленности (рисунок 2) гидроакустического рекордера достигает 17 дБ в пределах 1/3-октавной полосы. Использование таких характеристик приводит к результатам, неприемлемым с точки зрения современных требований к точности измерений подводного шума.

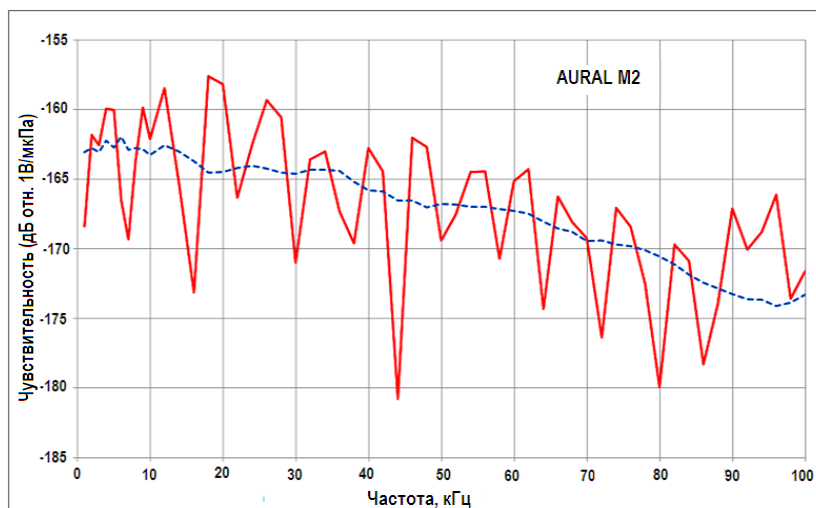


Рисунок 1 - Неравномерность частотной зависимости чувствительности гидроакустического рекордера

Аналогичные проблемы характерны и для отечественных конструкций гидроакустического приёмника.

Использование линейно-частотного модулированного сигнала (ЛЧМ-сигнала) позволяет получать при градуировке в бассейне подробные частотные характеристики гидроакустического приёмника. По такой характеристике можно рассчитать чувствительность в полосах частот, используемых для измерения уровня подводного шума.

Неравномерность характеристик того же рекордера в 1/3-октавных частотных полосах немногим превышает 2 дБ. Градуировка в полосах частот (например с использованием ЛЧМ сигнала) позволяет этим рекордером измерить уровень подводного шума значительно точнее.

¹ Доктор технических наук, начальник лаборатории.

² Научный сотрудник.

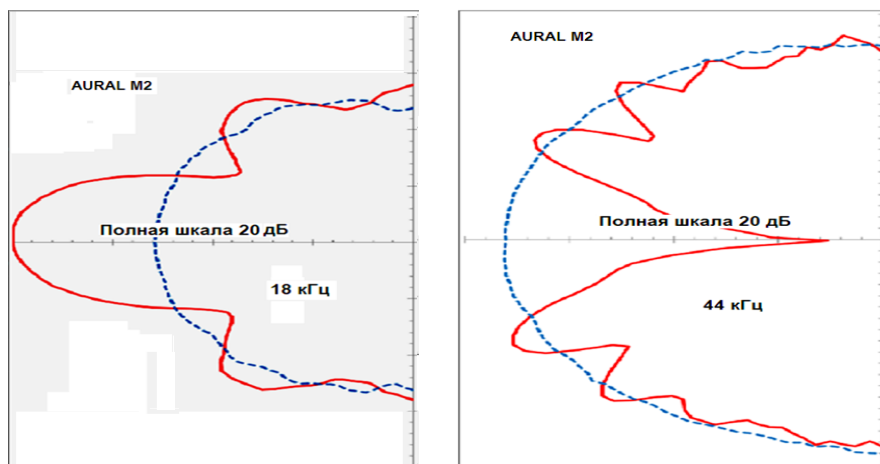


Рисунок 2 - Неравномерность характеристик направленности гидроакустического рекордера

Дальнейшее уменьшение инструментальной погрешности измерений уровня подводного шума (УПШ) связано с решением задачи градуировки приёмника на шумовом сигнале, по спектральному составу подобном излучаемому морским объектом. Выполнению такой градуировки препятствует реверберация звука в бассейне.

Реверберация искажает форму принимаемого сигнала и ограничивает возможности метрологических работ в бассейне. Расширение номенклатуры измеряемых параметров гидроакустического поля (например, пиковое значение гидроакустического давления, экспозиция звукового события), вызванное активной международной стандартизацией, и ужесточение требований к точности измерений требуют преодоления этих ограничений.

Пока не удаётся подавить реверберацию звука в бассейне с помощью специальных звукопоглощающих покрытий, также эффективно как в безэховой камере в воздушной акустике.

Известные попытки построить исчерпывающее математическое описание звукового поля в бассейне практического выхода пока не получили.

Для задач градуировки возможен другой подход - использовать сокращённое описание, работающее для двух точек - мест расположения излучателя и приёмника [2].

При таком подходе можно представить для реверберационного поля систему излучатель-бассейн-приёмник линейным четырёхполосником (рисунок 3).

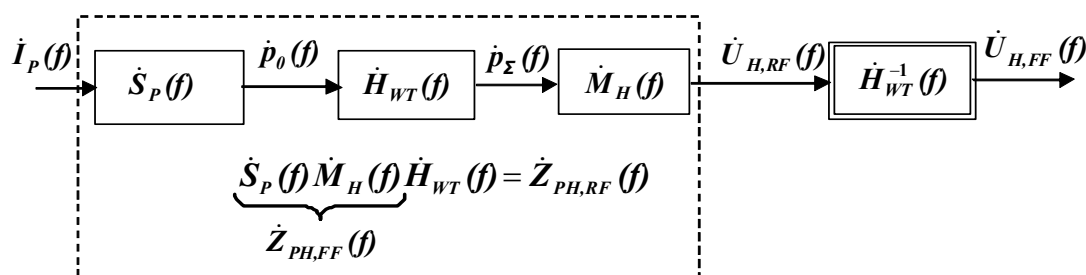


Рисунок 3 - Линейный четырёхполосник системы «излучатель-бассейн-приёмник»

Входом и выходом четырёхполосника являются соответственно ток излучателя и выходное напряжение приёмника.

Это позволяет применить математический аппарат передаточных функций для восстановления прямого сигнала с приемлемым для градуировки качеством и решать поставленную задачу - выполнять градуировку гидроакустического приёмника на сигнале заданной формы.

Для учёта влияния отражений поверхностей бассейна, введём понятие передаточной функций бассейна (ПФБ) по звуковому давлению как отношение звуковых давлений в реверберационном и свободном поле в точке приёма.

При этом передаточный импеданс пары излучатель-приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна представим, как произведение передаточного импеданса в свободном поле и ПФБ.

Заданную таким образом ПФБ можно получить, как отношение передаточных импедансов пары излучатель-приёмник в реверберационном и свободном звуковом поле:

$$H_{WF}(f) = \frac{Z_{RF}(f)}{Z_{FF}(f)}$$

где:

$H_{WF}(f)$ – передаточная функция бассейна;

$Z_{RF}(f)$ – передаточный импеданс пары излучатель-приемник в реверберационном поле;

$Z_{FF}(f)$ – передаточный импеданс пары излучатель-приемник в свободном поле.

Из формулы для ПФБ следует выражение, позволяющее получить спектр напряжения приёмника в свободном поле умножением спектра приёмника в реверберационном поле на частотную зависимость, обратную ПФБ.

Для получения ПФБ нужно измерить частотные зависимости передаточного импеданса в реверберационном поле бассейна и в свободном поле, а затем поделить одну зависимость на другую. Остаётся задача - получить по реверберационному сигналу передаточный импеданс в свободном и реверберационном поле.

В рамках традиционных подходов к использованию методов реализации условий свободного поля при градуировке (временная селекция, спектрометрия временных задержек (СВЗ), гомоморфная пост обработка (ГПО) и т.п.) получить ПФБ не удаётся.

Перечисленные методы предполагают усечение сигнала приёмника во временной (тонально-импульсный метод), кепстральной (ГПО), либо частотной (СВЗ) области и отбрасывание реверберационной части сигнала, которая воспринимается неинформативная помеха. Утрата информации о реверберации, заключенной в отбрасываемой части сигнала, не позволяет использовать эти методы для определения ПФБ.

Частотную зависимость передаточного импеданса пары излучатель-приёмник в реверберационном поле можно определять в реверберационном поле стационарного шума как отношение взаимного спектра тока излучателя и напряжения приёмника к спектру мощности тока излучателя [3].

ПФБ получается как частное от деления частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приёмник в реверберационном поле на результат обработки частотной зависимости передаточного импеданса пары по методу скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ).

При известной ПФБ, спектр прямого сигнала получается, как частное от деления спектра выходного напряжения приёмника на полученную ПФБ [4].

Далее представлены результаты нескольких экспериментов по исследованию метода.

Эксперимент с белым шумом.

На рисунке 4 показаны:

- спектр шумового сигнала приёмника в реверберационном поле бассейна,
- опорный (излучённый) спектр
- и средний уровень опорного спектра.

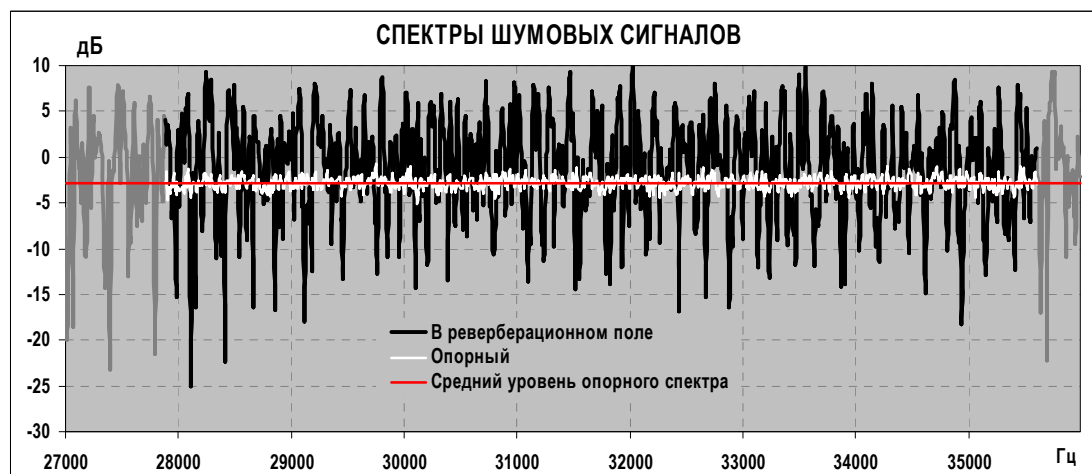


Рисунок 4 - Спектры сигналов в эксперименте с белым шумом

На частотах глубоких провалов реверберационного спектра суммарная реверберационная звуковая волна по амплитуде близка к прямой волне излучателя и противоположна ей по фазе, т. е. бассейн режетирует звуковую волну, подавляя её отражёнными волнами.

На рисунке 5 представлены результаты восстановления сигнала:

спектры опорного и восстановленного шумовых сигналов, и разностный спектр.

Опорный и восстановленный спектры демонстрируют хорошее совпадение за исключением частот глубоких провалов реверберационного спектра. Выбросы на этих частотах являются следствием некорректности решаемой обратной задачи.

Выбросы можно убрать накоплением большего числа спектров, но это существенно затягивает эксперимент. В этой ситуации более эффективно применять предложенный В. К. Масловым способ нелинейной обработки, названный «метод парикмахера».

Редкие узкие выбросы спектра оказывают малое влияние при измерении энергетических характеристик шума. Например, различие среднеквадратических значений (СКЗ) в 1/3-октавной полосе частот опорного и восстановленного сигналов незначительны и составляют 3,3 % (менее 0,3 дБ), что сопоставимо с допусками на эффективную ширину полосы пропускания электронных 1/3 октавных фильтров 1 класса.

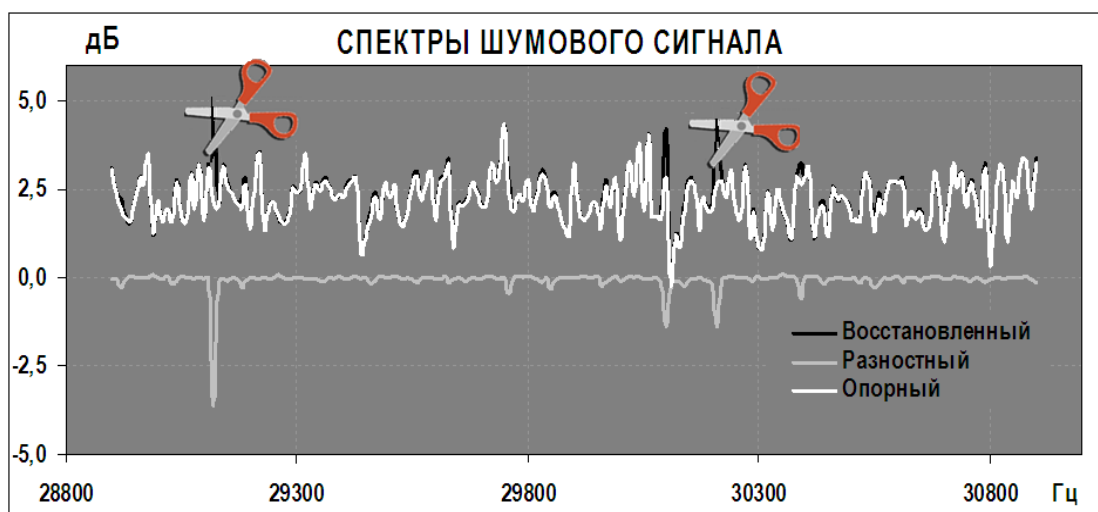


Рисунок 5 - Восстановленный спектр сигнала в эксперименте с белым шумом

Эксперимент с «окрашенным» шумом

В качестве «окрашенного» шума применяли шум, спектр мощности которого имеет равномерный наклон -36 дБ на октаву. Различие СКЗ в 1/3-октавной полосе частот, опорного и восстановленного «окрашенного» шума не превысило 2,6 %, а применение «простригания» спектра уменьшает это различие до 0,6 - 0,9 %. См. рисунок 6



Рисунок 6 - Восстановленный спектр сигнала в эксперименте с розовым шумом

Эксперимент с колоколообразным спектром

ПФБ определяли на «белом» шуме. После этого в тракт излучателя включили фильтр с полосой пропускания 24 % и с использованием полученной ПФБ восстанавливали спектр шума с колоколообразной огибающей.

В качестве опорного спектра использовали частотную характеристику фильтра, которую предварительно получили электрическими измерениями. Степень подавления реверберационных искажений можно оценить по практически полному совпадению опорного и восстановленного спектров (рисунок 7).

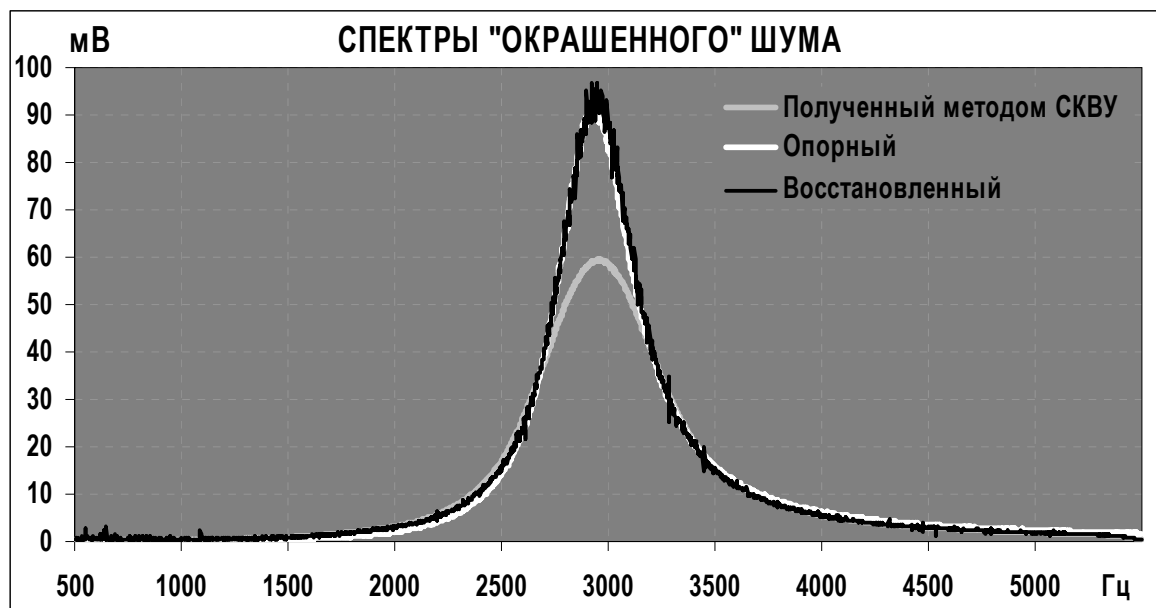


Рисунок 7 - Спектры сигналов в эксперименте с колоколообразным шумом

Отличие частотной зависимости, полученной прямой обработкой реверберационного спектра по методу СКВУ, наглядно демонстрирует влияние ограничения, накладываемого частотно-временным соотношением неопределенностей на результаты измерений в бассейне конечных размеров.

Эксперименты с «окрашенным» шумом показали возможность восстанавливать наклонные участки спектра сигнала, эксперимент с колоколообразным спектром показал возможность восстанавливать спектры с перегибами огибающей. Особенность эксперимента с колоколообразным спектром - в попытке проверить возможность сквозной градуировки гидроакустического спектрометра в условиях лабораторного бассейна. Полученный результат невозможен, например, при излучении ЛЧМ сигнала, который не позволяет определить ПФБ.

Эксперимент с импульсным звуком

Эксперимент выполняли в малом бассейне государственного первичного эталона (ГПЭ). Излучатель возбуждали шумовым импульсом, подобным по форме акустическому сигналу удара морского копра. Продолжительность импульса возбуждения немногим превышала 4 мс.

В отличие от стационарного шума ток в цепи излучателя и напряжение приёмника регистрировали от момента начала излучения (начала приёма) в течение времени, достаточного, чтобы «реверберационный шлейф» сигнала приёмника оказался скрытым помехой. Это время составило 25 мс.

На рисунке 8 изображены осциллограммы импульсных сигналов: на выходе приёмника в реверберационном звуковом поле, опорного и восстановленного с использованием ПФБ.

Различия пик-пиковых значений опорного и восстановленного импульсов составило $\sim 1,3$ дБ, что соизмеримо с погрешностью градуировки рабочих измерительных гидрофонов, а расхождение в значениях уровней звуковой экспозиции не превысило 1 %, что представляет пренебрежимо малую величину в сравнении с нормированными в стандартах значениями погрешности измерений подводного шума 1,5 - 3 дБ.

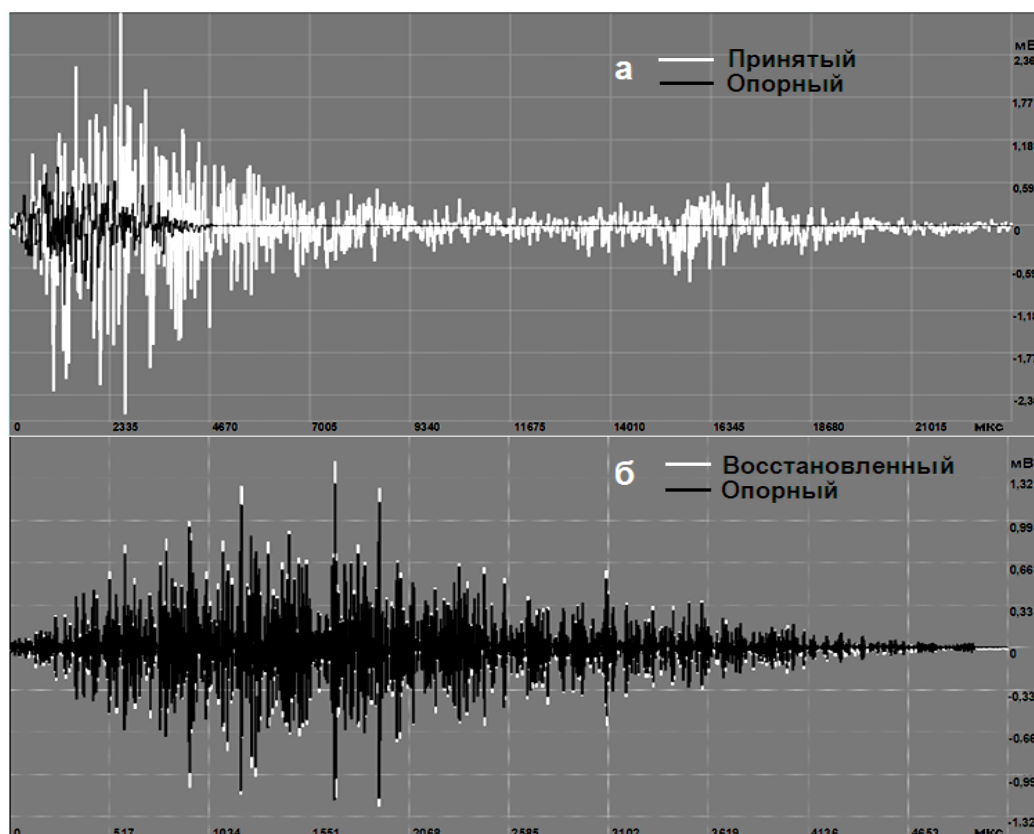


Рисунок 8 - Осциллограммы импульсных сигналов

Выводы

Экспериментальные исследования показывают, что использование ПФБ позволяет:

- обойти ограничения, накладываемые частотно-временным соотношением неопределённостей при приёме сигналов в условиях, отягощённых реверберацией звука в бассейне;
- подавлять реверберационные искажения спектра шумового сигнала с качеством, сопоставимым с допусками на эффективную ширину полосы пропускания 1/3-октавных фильтров 1 класса;
- подавлять реверберационные искажения формы шумового сигнала (коэффициент корреляции до 0,99 включительно) и импульсного звука: различие пик-пиковых значений 13,5 % (соизмеримо с погрешностью градуировки рабочих измерительных гидрофонов), расхождение уровней звуковой экспозиции не более 1 %.
- выполнять в незаглушённом лабораторном бассейне исследования акустических свойств и градуировку гидроакустических приёмников на шумовых сигналах, подобных излучаемым подводными объектами

Литература

1. **Nauman G., Lepper P., Robinson S.**, The calibration and characterization of autonomous underwater recorders // Proc. of the 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics UA2014 : ed. J. S. Papadakis, L. Bjørnø. – Rhodes, Greece. – 2014. – P. 1103-1108
2. **Исаев, А. Е.** Лабораторная модель гидроакустического приёмника / Исаев, А. Е., Черников И.В. // Измерительная техника. – 2015. – № 6. – С. 59-63.
3. **Исаев А. Е.** Использование реверберационных звуковых полей для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне / Исаев А. Е., Черников И. В. // Измерительная техника. – 2015. – № 12. – С. 50-54.
4. **Исаев А. Е.** Градуировка гидроакустического приёмника с использованием передаточной функции бассейна / Исаев А. Е., Николаенко А. С., Поликарпов А. М., Черников И. В. // Альманах современной метрологии. – ФГУП «ВНИИФТРИ». – 2015. – № 4. – С. 67-111.

ОЦЕНИВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А. И. Скалон¹

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург, e-mail: skalon_ai@mail.ru

Аннотация

Ключевые слова: нелинейные системы, автоколебания, динамические характеристики, циклограммы

Исследования движения инерционных масс (ИМ) инерциальных датчиков первичной информации показали, что оно носит достаточно сложный характер, который зависит от частоты и амплитуды входного воздействия. Предложено с целью оценивания динамических характеристик и погрешностей использовать циклограммы, которые отражают изменение как выходного сигнала, так и информацию о характере изменения периода автоколебаний. Приведено математическое описание соответствующей зависимости. Построены амплитудная и частотная характеристики, показывающие изменения динамической погрешности движения ИМ.

Проведённые исследования, например, [1, 2], показали, что движение нелинейных систем значительно сложнее и многообразнее по сравнению с линейными аналогами и зависит как от типа нелинейности, реализуемой в системе, так и от параметров последней. Особенность анализа динамических процессов в инерциальных датчиках первичной информации (ДПИ), работающих в режиме автоколебаний, заключается в том, что целью исследований является определение параметров движения центра колебаний подвижного узла (ПУ) как некоторой точки, перемещение которой несет информацию о входном воздействии. При этом достаточно логичным представляется применение такого же подхода к оценке динамических характеристик, который используется в линейных системах, т.е. анализ реакции системы на типовые воздействия: ступенчатое или импульсное и гармоническое. Причем, первые два вида воздействий используют для оценки свойств системы во временной области, а последнее, гармоническое для анализа характеристик системы в частотной области.

Поскольку типовая структура создаваемых приборов содержит линейную и нелинейную части (рисунок 1) то движение ИМ (чувствительного элемента – ЧЭ) описывается дифференциальным уравнением третьего порядка, а наличие в контуре прибора нелинейного звена приводит к возникновению автоколебаний, что делает естественным применение для анализа характеристик метода гармонической линеаризации.

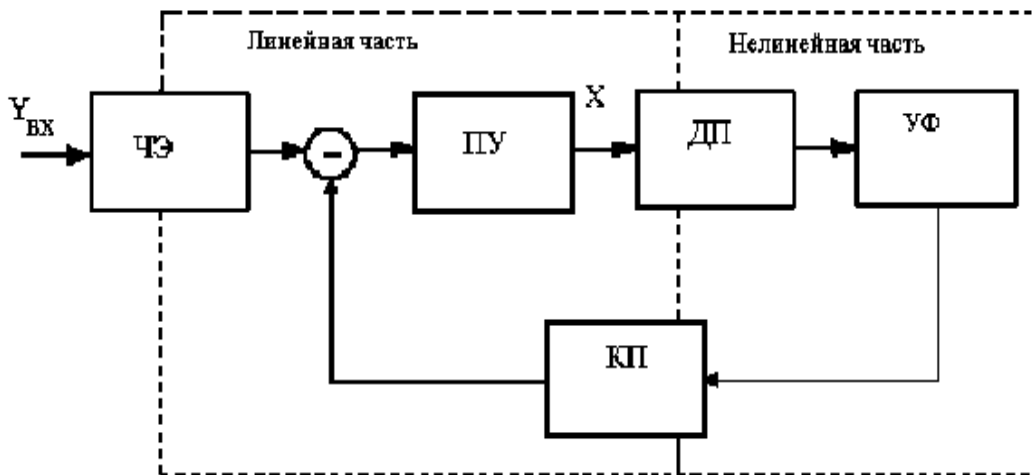


Рисунок 1 - Структурная схема автоколебательного ДПИ

Наличие собственного периодического движения ПУ прибора накладывает отпечаток на динамику системы, а само понятие динамики становится многообразным, поскольку, как правило, речь идет об анализе многочастотных колебаний. Особенность анализа динамики автоколебательных систем заключается в том, что в них "не работает" принцип суперпозиции движений, и они представляют собой динамическую систему с диссипацией, подкачкой энергии и внешним воздействием. Наличие

¹ Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

диссипации и постоянного притока энергии приводит к тому, что система через некоторое время теряет информацию о начальных условиях. Траектории в фазовом пространстве, описывающие движение системы, сходятся к некоторому притягивающему множеству – аттрактору.

Проведённые исследования выявили, что аналитические методы решения дают возможность показать принципиальную сходимость движения к аттрактору, но не позволяют получить точные решения, описывающие динамику системы в каждой из выделенных областей.

Численное моделирование позволило оценить общий характер движения на плоскости A, ω при наличии внешнего гармонического воздействия и определить область "собственного" движения, т.е. область, в которой система совершает колебания под действием сигнала управления с нелинейным наложением колебаний, вызываемых внешними возмущениями. Границы этой области (рисунок 2) определяются условиями захвата, т.е. переходом системы в режим одночастотных вынужденных колебаний на частоте внешней силы.

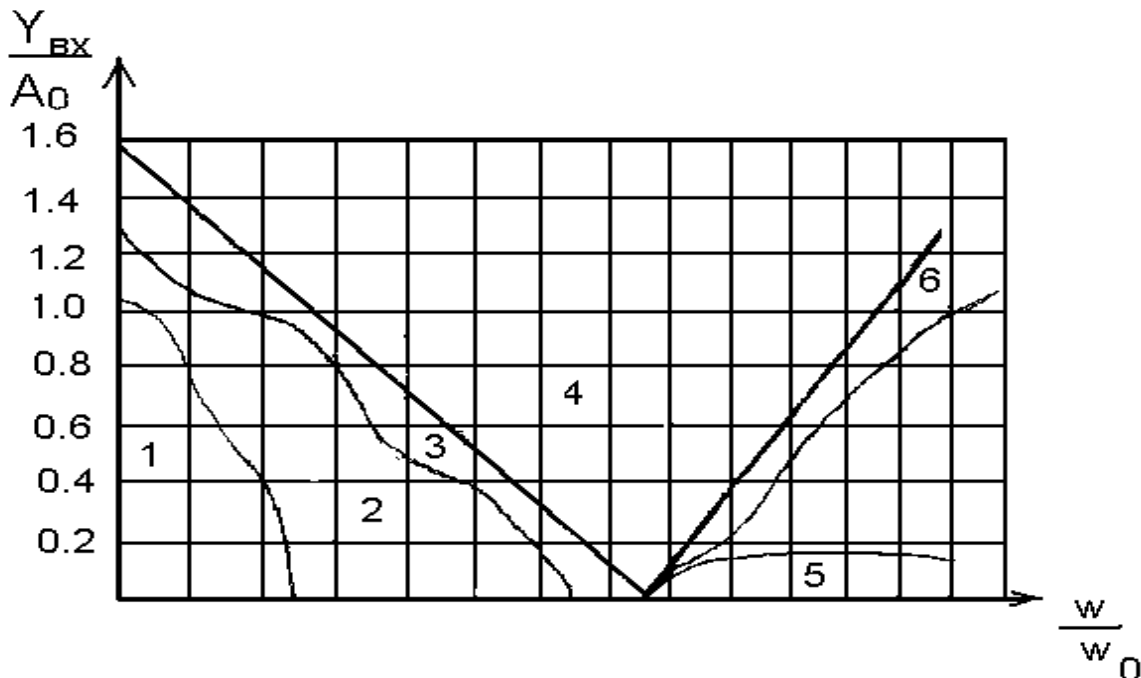


Рисунок 2 - Области движения ИМ при различных входных воздействиях

Результаты моделирования показали, что если частота внешнего воздействия меньше частоты ω_0 собственных колебаний, то в движении системы может быть выделено четыре режима. Первый режим, квазипериодический, является суммой двух гармонических сигналов с разными частотами (1). Второй режим (2) может быть определен как квазихаотический, в котором сложно выделить закономерности даже в процессе численного моделирования. Третий и четвертый режимы представляют собой периодическое движение либо с периодом, кратным периоду внешнего воздействия (3), либо с частотой внешнего воздействия (4), соответственно. При этом последний режим характеризует явление захвата.

В том случае, когда $\omega_{вх} > \omega_0$, движение системы имеет существенно другой характер и в нем можно выделить еще два режима. Пятый режим колебаний возникает при небольших амплитудах возмущающего воздействия и носит почти периодический характер с небольшой амплитудной модуляцией (5), причем, увеличение частоты возмущающего воздействия не влияет на характер движения системы. При увеличении амплитуды возмущающего воздействия колебания принимают вид биений (шестой режим) с наличием участков увеличения амплитуды колебаний (6). Колебания имеют периодический характер с частотой, кратной частоте возмущающего воздействия.

Наличие периодических колебаний делает естественным применение метода гармонической линеаризации.

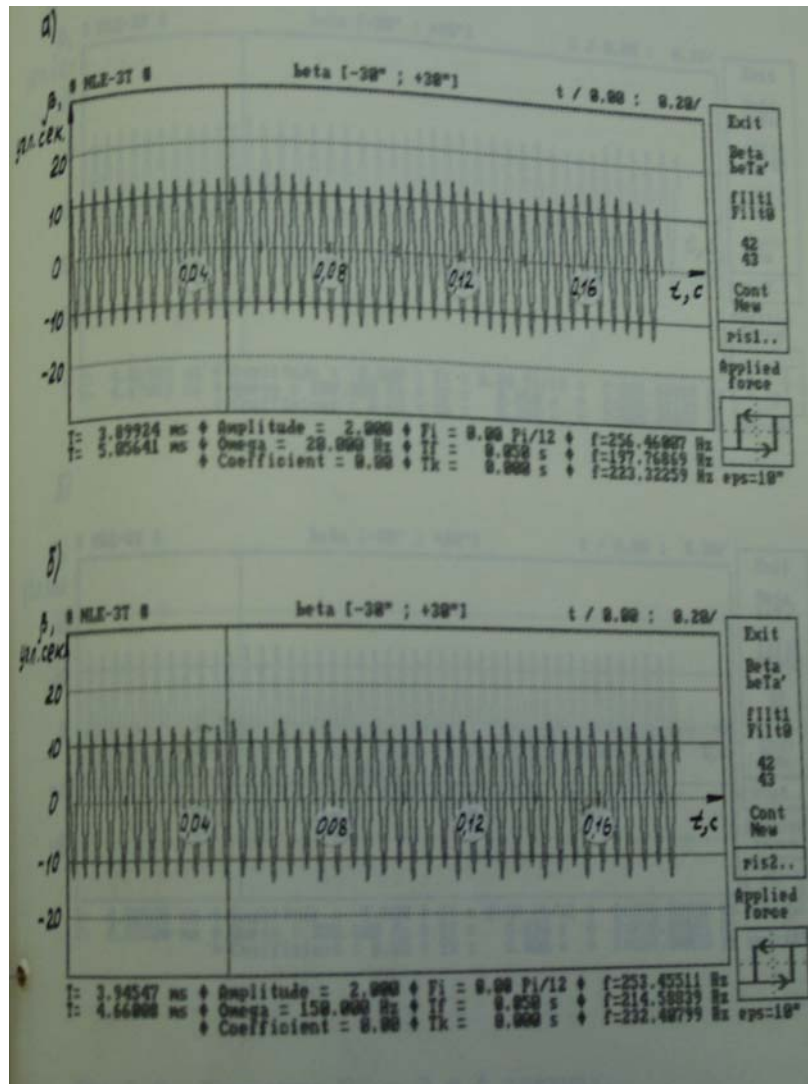


Рисунок 3 - Пример движения ИМ а) в режиме 1 ($A = 2.0$, $f = 20$ Гц), б) в режиме 2 ($A = 2.0$, $f = 150$ Гц).

При этом гармонически линеаризованные уравнения, описывающие движение системы, принимают вид:

$$(T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1)(T_2 p + 1)x^* + K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} \left(\Phi^0 + qx^* + \frac{q^1}{\omega} px^* \right) = K_1 (T_2 p + 1) Y_{\text{BX}} \quad (1)$$

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)px^* + K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} \left(\Phi^0 + qx^* + \frac{q^1}{\omega} px^* \right) = K_1 (T_2 p + 1) Y_{\text{BX}} \quad (2)$$

Второе уравнение описывает движение системы, обладающей малой жесткостью.

Выполнение условия медленности изменений входного воздействия дает возможность далее применить принцип разделения движения на медленную и колебательную составляющие и записать два соответствующих уравнения:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)px^0 + K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} (\Phi^0) = K_1 (T_2 p + 1) Y_{\text{BX}} \quad (3)$$

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)px^* + K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} \left(q(A) + \frac{q^1}{\omega} p \right) x^* = 0, \quad (4)$$

где (3) отражает реакцию системы на Y_{BX} , а (4) описывает ее собственное движение.

Функция смещения $\Phi^0 = \Phi(x^0)$ представляет собой некоторую статическую характеристику, которая определяет нелинейную зависимость между входной и выходной величинами при постоянных или медленно меняющихся сигналах.

Функция смещения и коэффициенты гармонической линеаризации зависят от вида нелинейности и от смещения центра колебаний x^0 . Для любых нелинейностей функция смещения при определенных условиях может быть представлена плавной кривой, что является следствием эффекта вибрационного сглаживания с помощью автоколебаний [1].

С учетом отмеченных условий, в определенном диапазоне изменений x^0 функция смещения может быть представлена в виде

$$\Phi^0(x^0) = K_B x^0, \quad (5)$$

где $K_B = \left(\frac{d\Phi^0}{dx^0} \right)_{x^0 \rightarrow 0}$.

Таким образом, наличие автоколебаний дает возможность представить нелинейную функцию $\Phi(x, px)$ в виде линейной зависимости (5) и записать уравнение (3) как линейное дифференциальное уравнение:

$$(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) p x^0 + K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} K_B x^0 = K_1 (T_2 p + 1) Y_{\text{ВХ}}. \quad (6)$$

Если принять, что входное воздействие фиксировано в некоторые моменты времени, то уравнение (6) можно представить как алгебраическое соотношение вида

$$K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} K_B x^0 = K_1 Y_{\text{ВХ}}. \quad (7)$$

Из полученного выражения следует, что смещение x^0 центра колебаний ПУ пропорционально величине входного воздействия:

$$x^0 = \frac{K_1}{K_{\text{Л}} K_{\text{ПУ}} K_B} Y_{\text{ВХ}}. \quad (8)$$

Анализируя (8), следует отметить, что это соотношение характеризует установившееся состояние рассматриваемой системы, при котором уравновешены входное и компенсирующее воздействия, приложенные к ПУ прибора, т.е.

$$F_{\text{ВХ}} = F_{\text{КП}}. \quad (9)$$

При этом

$$F_{\text{ВХ}} = K_{\text{ПП}} Y_{\text{ВХ}} \quad (10)$$

$$F_{\text{КП}} = K_{\text{КП}} U_{\text{СР}}.$$

Величина управляющего сигнала за период T_0 автоколебаний определяется интегралом вида

$$U_{\text{СР}} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} u(t) dt.$$

При прямоугольной форме импульсов управляющего сигнала

$$U_{\text{СР}} = U_0 \frac{\tau_1 - \tau_2}{T_0}. \quad (11)$$

Обобщение результатов аналогичного анализа для других типов компенсирующих преобразователей позволяет сделать заключение о том, что соотношение (11) является достаточно общим и справедливо для случаев биполярного управления на периоде T_0 автоколебаний.

Таким образом, из приведенных соотношений следует, что

$$\tau_1 - \tau_2 = \frac{T_0}{K_{\text{КП}} U_0} F_{\text{ВХ}} = \frac{K_{\text{ПП}} T_0}{K_{\text{КП}} U_0} Y_{\text{ВХ}}. \quad (12)$$

При переходе к цифровому виду, выходная информация ДПИ может быть представлена в десятичном коде:

$$N = n_1 - n_2 = \frac{K_{\text{ПП}} T_0 K_N}{K_{\text{КП}} U_0} Y_{\text{ВХ}}, \quad (13)$$

где

$$\frac{K_{\text{ПП}} T_0 K_N}{K_{\text{КП}} U_0} Y_{\text{ВХ}} = K_{\Sigma} \quad (14)$$

представляет собой коэффициент преобразования ДПИ.

Полученные выражения показывают, что такие ДПИ представляют собой импульсные модуляторы, осуществляющие динамическое преобразование измеряемой величины во временные интервалы.

Из (13) следует, что разность длительности импульсов пропорциональна величине входного воздействия. Однако при этом также происходит изменение периода автоколебаний. Дальнейшая процедура обработки полученной информации заключается в построении циклограмм, примеры которых приведены на рисунках, а также амплитудных и частотных характеристик погрешностей ДПИ. В качестве примера ниже приведены циклограммы, отражающие движение ИМ при различном входном воздействии.

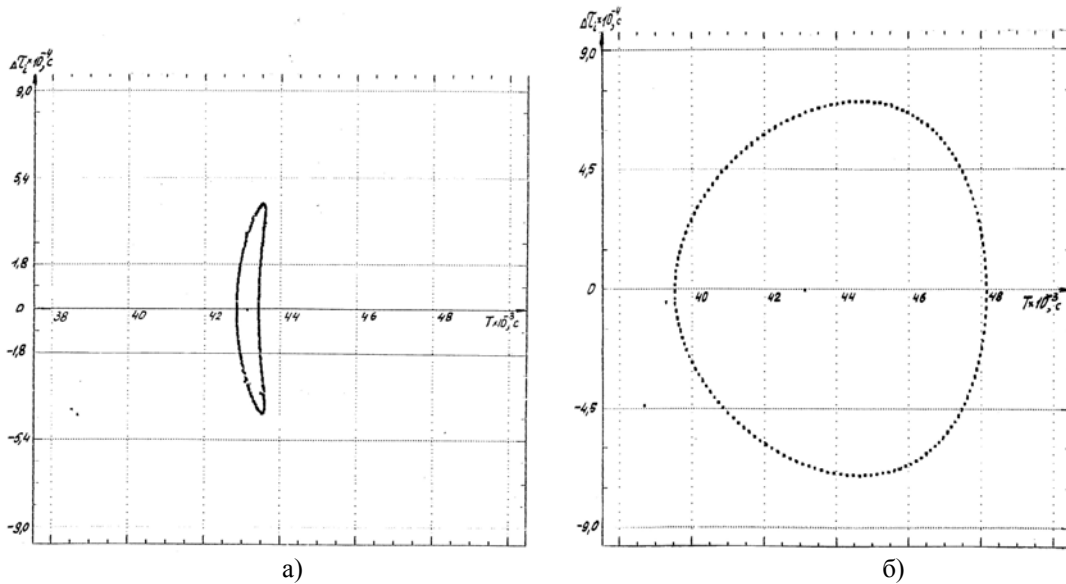


Рисунок 3 - Циклограмма движения ИМ маятникового акселерометра при различных входных воздействиях: а) амплитуда $0,1 Y_{\text{ВХ}}$, частота 10 Гц, б) амплитуда $0,5 Y_{\text{ВХ}}$, частота 10 Гц.

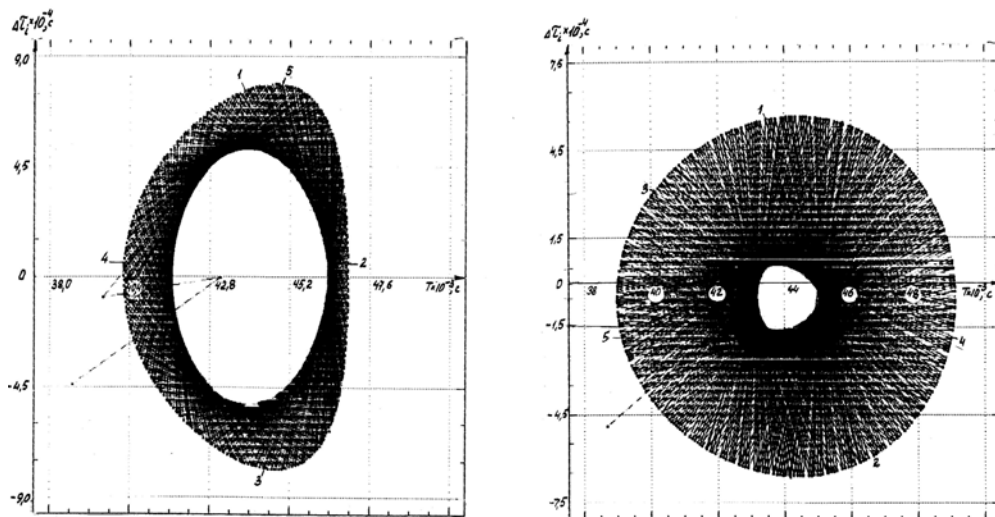


Рисунок 4 - Циклограмма движения ИМ маятникового акселерометра при различных входных воздействиях: а) амплитуда $0,1 Y_{\text{ВХ}}$, частота 50 Гц, б) амплитуда $0,5 Y_{\text{ВХ}}$, частота 50 Гц.

Обработка циклограмм дает возможность построить амплитудно-частотную и временную зависимости от величины входного воздействия (рисунок 5).

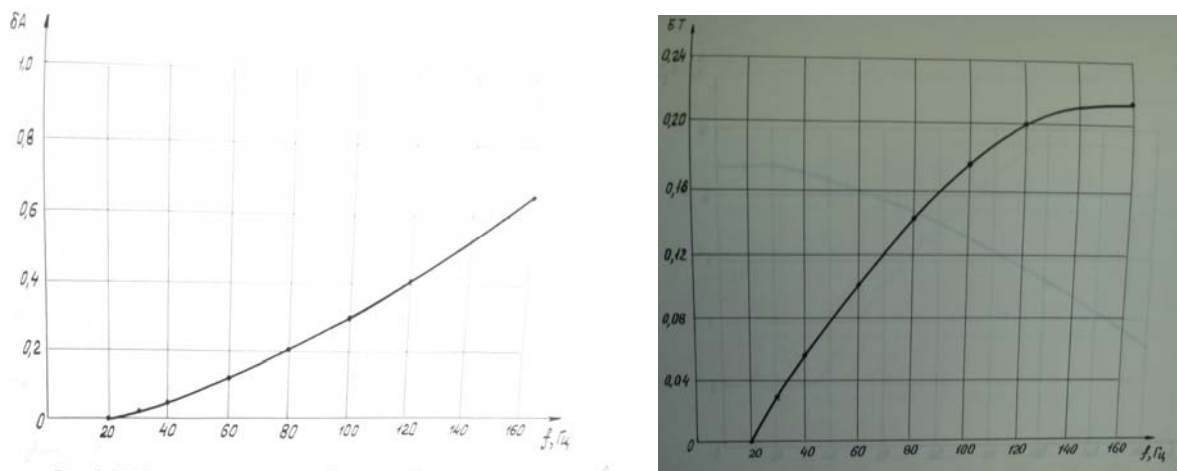


Рисунок 5 - Характеристики динамических погрешностей: а) амплитудной погрешности, б) временной (частотной) погрешности воспроизведения входного воздействия

Таким образом разработана новая методика, которая позволяет проводить оценивание динамических характеристик инерциальных датчиков первичной информации, работающих в режиме автоколебаний.

Литература

- 1 Пальтов И. П., Попов Е. П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. - М.: Физматгиз, 1960.-792 с.
- 2 Скалон, А. И. Обобщенный анализ характеристик прецизионных датчиков механических величин, работающих в режиме автоколебаний // Измерительная техника.-1990.- № 3.-С.7-9.
- 3 Андронов А. А. Предельные циклы Пуанкаре и теория колебаний / //Доклады 6-го съезда русских физиков.- М.,1928.-С. 35-47.

ТЕОРИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

УМЕНЬШЕНИЕ СООТНОШЕНИЯ ТОЧНОСТЕЙ ЭТАЛОНА И ПОВЕРЯЕМОГО СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ С СУЩЕСТВЕННОЙ СЛУЧАЙНОЙ И ПОСТОЯННОЙ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ

В. А. Грановский¹, М. Д. Кудрявцев²

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ, e-mail: vgranovsky@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: поверяемое средство измерений, эталон, соотношение точностей (погрешностей), номинальные (нормативно установленные) и действительные характеристики погрешностей.

Рассмотрена задача поверки средства измерений (СИ), характеризующегося постоянной систематической и существенной случайной погрешностью, путем сличений с эталоном. Показано, что точность оценки характеристик погрешности СИ обусловлена не только соотношением погрешностей СИ и эталона, но также точностью оценки погрешности эталона. За счет повышения точности оценки погрешности эталона может быть уменьшено необходимое соотношение точностей СИ и эталона. Таким образом, в качестве эталона может быть использовано средство, близкое по точности к поверяемому СИ, в том случае, когда точность указанного средства изучена особо тщательно.

Введение

Поверка измерительного прибора, измерительного преобразователя, измерительной установки (системы) может быть осуществлена путем измерений (преобразований) одной и той же измеряемой величины с помощью поверяемого СИ и с помощью эталона. Различие показаний СИ и эталона служит источником сведений о погрешности поверяемого СИ. В предельном случае, когда погрешность эталона пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью СИ, последняя оценивается как разность показаний сличаемых устройств. Необходимое соотношение точностей эталона и поверяемого СИ трактуется как минимальное отношение определенной характеристики погрешности СИ к той же характеристике погрешности эталона. Понятно, что от соотношения точностей устройств зависит стоимость поверки, поэтому уменьшение этого соотношения всегда актуально. Более того, при установленном (нормативно или традиционно) соотношении точностей может оказаться невозможной требуемая в ряде ситуаций поверка в условиях эксплуатации. Все сказанное относится также и к процедуре калибровки СИ. Кроме того, помимо СИ утвержденных типов, аналогичным образом могут быть рассмотрены любые технические системы и устройства с измерительными функциями и процедуры подтверждения их соответствия установленным требованиям. Примерами таких процедур могут служить испытания компонентов инерциальной навигационной системы (в том числе, ее курсового канала), а также аттестация измерительной части различных автоматизированных систем управления технологическими процессами.

На практике соотношение точностей поверяемого СИ и эталона установлено в ряде нормативных документов [1–5] в достаточно протяженном диапазоне от 1:1,25 до 1:5 (и шире), но чаще всего оно устанавливается по традиции и, как правило, составляет 1:3. Важно отметить и тот факт, что указанное соотношение адресовано к номинальным (нормативно установленным) характеристикам погрешностей СИ и эталона. Такое соотношение обосновано для конкретных условий (структур погрешностей сличаемых устройств) [6], которые, однако, почти никогда не проверяются в практике. С этой точки зрения, предпринятые авторами исследования с целью обоснования соотношения, представляются также актуальными.

Указанные выше общие положения конкретизируются по-разному в зависимости от структуры погрешностей СИ и эталона. В докладе рассмотрены случаи, когда эта структура одинакова и содержит постоянную систематическую и существенную на ее фоне случайную составляющие погрешности.

Ниже полагается, что показания СИ и эталона отсчитываются одновременно (выходные сигналы синхронизированы), что позволяет сформировать множество разностей показаний (разностных сигналов), которое подвергается анализу. Таким образом, охватывается общий случай измерений в динамическом режиме.

Постановка формальной задачи

¹ Доктор технических наук главный научный сотрудник.

² Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

Для достижения поставленной цели в докладе рассмотрены варианты задачи обработки данных (показаний) сличаемых устройств, которая формализуется следующим образом.

Систематические погрешности поверяемого СИ и эталона составляют, соответственно, Φ и Φ_3 . Следовательно, взаимное смещение шкал (рядов показаний) устройств составляет $\Delta\Phi = \Phi - \Phi_3$, и $\Delta\Phi$ существенно меньше нормы погрешности поверяемого СИ. В процессе сличений на выходах устройств формируются и регистрируются массивы показаний (оценок измеряемой величины) $\{\varphi_i\}$ и $\{\varphi_{3,i}\}$ в дискретные моменты времени $\{t_i\}$, где $i = 1, \dots, n$. Объем массивов n определяется временем сличений и частотой дискретизации при выработке цифровых сигналов (частотой съема данных). Ниже полагается, что время поверки (особенно, автоматизированной) не имеет больших ограничений, так что объем массивов n может достигать уровня, достаточного не только для обычного дисперсионного анализа, но и для надежной проверки гипотезы о виде распределения вероятностей случайной погрешности, в том числе, путем выполнения серии нескольких независимых однотипных процедур поверки с выключением и повторным включением поверяемого СИ и его выходом в установившийся режим.

Предполагается также, что данные массивов вырабатываются с достаточной степенью синхронизации (для оценивания в динамическом режиме медленно меняющейся составляющей измеряемой величины), что позволяет сформировать массив разностей показаний $\{x_i\}$, где $x_i = \varphi_i - \varphi_{3,i}$, не содержащий данных об измеряемой величине. Показания $\varphi_{3,i}$, конечно, включают в себя информацию о точностных свойствах эталона, однако содержат ее в скрытой форме, поскольку остается неизвестным действительные значения измеряемой величины $\varphi_0 = \varphi_0(t)$ в каждый конкретный момент времени t . При этом, даже если конструкция эталона обеспечивает отсутствие систематической погрешности, в общем случае остается неизвестным соотношение спектров случайной погрешности эталона и измеряемой величины как функции времени, что не позволяет обоснованно установить параметры усреднения случайной погрешности с целью определения измеряемой величины. Достоверными данными об эталоне остаются нормативные показатели, к числу которых, как правило, относят пределы допускаемых значений среднего квадратического отклонения (СКО) случайной составляющей погрешности (вместе с пределами неисключенной составляющей систематической погрешности) или доверительные границы для полной погрешности. Для исправного эталона действительная граница погрешности может оказаться более низкой, но поскольку она неизвестна, то статистические выводы, сделанные на основе нормативного показателя, окажутся менее достоверными и могут даже привести к ошибочному выводу о годности поверяемого СИ, в действительности негодного. Именно поэтому так важно получить сведения о действительном, а не нормативном, показателе точности эталона. Ниже полагается, что нормативный показатель эталона достаточно близок к действительному показателю, в противном случае должен использоваться действительный показатель.

Понятно, что разность показаний x может быть представлена символической суммой погрешности начальной выставки $\Delta\Phi$ (взаимное смещение шкал) и случайных составляющих погрешностей сличаемых устройств ξ , ξ_3 :

$$x = \Delta\Phi \oplus \xi \oplus \xi_3, \quad (1)$$

Уравнение (1) служит принципиальной методологической основой методики поверки СИ путем его сличений с эталоном.

В дальнейшем массив $\{x_i\}$ рассматривается как выборка из генеральной совокупности, порождаемой суммой квазидетерминированного сдвига и эргодического стационарного процесса, который моделирует несовершенство функционирования СИ и эталона в установившемся режиме. Предполагается, что характер сдвига для конкретного СИ не меняется от включения к включению. Что касается стохастической части указанной выше суммы, то предположение о ее характере является довольно сильным и требует, вообще говоря, экспериментальной проверки. Проверка гипотезы стационарности вполне возможна с учетом значительных объемов выборок. Проверка гипотезы эргодичности может быть лишь частичной ввиду ограниченного числа повторных поверок. В то же время нужно подчеркнуть, что только в предположении эргодичности можно рассматривать временные ряды погрешностей как выборки из соответствующих генеральных совокупностей. Имея в виду указанное обстоятельство, возможно, стоило бы проверку эргодичности включить в состав испытаний СИ с целью утверждения типа (если случайная составляющая его погрешности является значимой на фоне систематической составляющей).

Предполагая стабильность работы сличаемых устройств, можно считать элементы массива $\{x_i\}$ разностями реализаций случайных величин ξ_i и $\xi_{3,i}$, которые характеризуются, соответственно, математическими ожиданиями a , a_3 и дисперсиями σ^2 , σ_3^2 (либо СКО σ , σ_3). Предполагается, что моменты каждой из величин ξ_i , $\xi_{3,i}$ могут изменяться от включения к включению СИ и эталона, но остаются постоянными в пределах периода работы после включения (что, вообще говоря, требует

экспериментальной проверки). При этом ввиду больших объемов выборок выборочные моменты величин ξ_i и $\xi_{3,i}$ будут практически совпадать с соответствующими вероятностными характеристиками, т. е., моментами рассматриваемых генеральных совокупностей.

Точностные требования к поверяемому СИ задаются, как правило, нормами на статистические характеристики его погрешности ξ . В первую очередь, используются СКО σ и границы доверительного интервала $\{a \pm K(P) \cdot \sigma; P, F\}$, где P – установленная доверительная вероятность, F – принятый закон распределения погрешности. Отметим, что в практике обычными являются значения $P=0,95$ или $P=0,997$, которым соответствуют доверительные границы, равные соответственно удвоенному или утроенному СКО σ для симметричного гауссова распределения. В этом случае задача обработки данных, полученных путем сличений СИ с эталоном, формулируется следующим образом:

(а) на основе анализа массива $\{x_i\}$, $i = 1, \dots, n$ разностей выходных сигналов φ_i и $\varphi_{3,i}$ сличаемых устройств установить, в соответствии с обоснованным критерием, отвечает ли действительное СКО σ погрешности поверяемого СИ требуемой норме σ_{\max} , и определить границы доверительного интервала $\{a \pm K(P) \cdot \sigma; P, F\}$ для заданного массива данных;

(б) повторить процедуру (а) для ряда включений СИ и определить доверительный интервал с наибольшими по модулю границами из совокупности всех полученных границ.

Таким образом, дальнейшее рассмотрение направлено на разработку методик решения изложенной выше формальной задачи и ее составляющих.

Указанная формальная задача распадается на ряд вариантов в зависимости от априорных сведений о параметрах массивов данных сличаемых устройств. В докладе рассмотрены варианты, представленные в таблице 1. Запись $a \in [a_n, a_b]$ означает, что среднее выборки изменяется от включения к включению, оставаясь постоянным в пределах одного включения. Запись $a = \text{const}$ означает, что среднее выборки остается постоянным также и от включения к включению. Поскольку в разностях $\{x_i\}$ отсутствуют данные измеряемой величины, то в табл. 1 указаны только параметры погрешностей поверяемого СИ и эталона.

Таблица 1

№ вар.	Параметр массива $\{\varphi_{3,i}\}$	Параметр массива $\{\varphi_i\}$	Анализируемые параметры		Примечание
			эталона	поверяемого СИ	
1	$a_3 = 0$	$a = 0$	σ_3	σ	–
2	$a_3 = 0$	$a = \text{const}$	σ_3	a, σ	–
3	$a_3 = 0$	$a \in [a_n, a_b]$	σ_3	$a(j), \sigma$	$j = 1, \dots, m$ – номер включения

Решение формальной задачи

В идейном отношении предлагаемое ниже решение опирается на концепцию обработки измерительных данных, содержащих случайные погрешности, которая реализована в [6]. Ее суть заключается в том, что оценка случайной погрешности, полученная по выборке ограниченного объема, являясь также случайной величиной, требует, чтобы была оценена ее (оценки) точность. Иными словами, автор [6] считает необходимым не ограничиться «первым этажом» статистической обработки массива измерительных данных, но перейти на второй этаж и оценить «погрешность погрешности» полученной в процессе измерений оценки измеряемой величины. Поэтому в [6] даже в случае прямых измерений, в отсутствие зависимости точности от измеряемой величины, выражение для результата измерения оказывается трехчленным. Идея перехода на «второй статистический этаж» положена авторами доклада в основу анализа.

1. Наличие только случайных искажений регистрируемых сигналов: $a_3 = a = 0$ (вариант 1 табл. 1).

1.1. Для получения аналитических решений, с учетом опыта поверки СИ и принятого характера и объема данных, а также того факта, что любой выборочный момент является асимптотически нормальным [7], целесообразно в качестве базовой использовать следующую стохастическую модель с несмещенным нормальным (гауссовским) распределением погрешностей СИ и эталона:

$$\begin{cases} \varphi_3(t) = \varphi_0(t) + \xi_3(t), & \xi_3(t) \sim N(0, \sigma_3^2) \text{ при любом } t=t_i; \\ \varphi(t) = \varphi_0(t) + \xi(t), & \xi(t) \sim N(0, \sigma^2) \text{ при любом } t=t_i, \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi_0(t)$ – неизвестное действительное значение измеряемой величины в момент времени t , в предположении, что показания сличаемых СИ взаимно некоррелированы: $\text{cov}[\xi(t), \xi_3(t)] = 0$ при любом $t=t_i$.

В этих условиях справедливо следующее выражение для дисперсии $D_x = D[x(t)]$ разности показаний $x(t) = \varphi(t) - \varphi_3(t) = \xi(t) - \xi_3(t)$ двух сличаемых СИ:

$$D_x = \sigma^2 + \sigma_3^2 \quad (3)$$

Выражение (3) служит основой простого критерия для проверки того, удовлетворяет ли предъявляемым требованиям действительное (остающееся неизвестным) СКО σ погрешности поверяемого СИ. Он основан на определении выборочной дисперсии \tilde{D}_x разностей $x_i = \varphi_i - \varphi_{3,i}$ дискретных показаний:

$$\tilde{D}_x = \sum_i (x_i - \bar{x})^2 / (n-1), \quad (4)$$

где $\bar{x} = n^{-1} \cdot \sum x_i$, которую, с учетом ее близости к дисперсии генеральной совокупности (3), сравниваем с суммой норм для дисперсий погрешностей поверяемого СИ и эталона, принимаемой в качестве допустимого верхнего предела оценки (4). В случае превышения указанной нормативной границы:

$$\tilde{D}_x > \sigma_{\max}^2 + \sigma_{3,\max}^2, \quad (5')$$

где σ_{\max} , $\sigma_{3,\max}$ – нормы на СКО погрешностей поверяемого СИ и эталона, поверяемое СИ гарантированно метрологически негодно, поскольку тогда однозначно $\sigma > \sigma_{\max}$. Однако для подтверждения его годности указанную границу следует несколько ужесточить, проверяя:

$$\tilde{D}_x \leq \sigma_{\max}^2 + M^2 \cdot \sigma_{3,\max}^2, \quad (5'')$$

где коэффициент $M = \inf\{\sigma_3 / \sigma_{3,\max}\} \approx 1$ определяет зону нечувствительности критерия, ширина которой пропорциональна $1-M$, и при нахождении в которой невозможно однозначно ответить на вопрос о годности/негодности поверяемого СИ.

Следует отметить, что критерий (5) в приведенной выше форме инвариантен к виду распределений погрешностей поверяемого СИ и эталона и в этом смысле далеко выходит за рамки модели (2). Однако он игнорирует возможную случайную погрешность оценки суммарной дисперсии (4), т.е. носит детерминированный характер.

Более детальный (и прямой) критерий проверки основан на нахождении СКО σ как действительной точностной характеристики поверяемого СИ. Поскольку экспериментально может быть найдена лишь выборочная оценка СКО, то решающее значение приобретает точность указанной оценки. В самом деле, для определения того, соответствует ли действительное СКО установленной норме, понадобится, опираясь на полученную выборочную оценку, определить практически достоверную верхнюю границу действительного СКО. Таковой может служить доверительная граница для выборочного СКО при доверительной вероятности, близкой к единице. Соответственно, для определения доверительной границы нужно оценить дисперсию выборочного СКО.

Для нахождения выборочной оценки СКО поверяемого СИ и ее дисперсии заменим в (3) моменты распределений их оценками и получим из преобразованного выражения (сохранив прежние обозначения σ , σ_3 для оценок СКО погрешностей сличаемых СИ) следующую формулу для вычисления оценки σ :

$$\sigma = \sqrt{\tilde{D}_x - \sigma_3^2}. \quad (6)$$

Приняв во внимание следующую известную оценку [7, 8] дисперсии $D(\tilde{D}_x)$ эмпирической дисперсии (4) в случае гауссовой модели (2)

$$D(\tilde{D}_x) = 2n^{-1}(\tilde{D}_x)^2 + O(n^{-2}), \quad (7)$$

можно получить искомую оценку дисперсии оценки (6) при условии значимости случайных погрешностей в ходе предварительного оценивания параметра σ_3^2 , которые будем характеризовать их выборочной дисперсией $D(\sigma_3^2)$:

$$D(\sigma) = \frac{\tilde{D}_x}{4(1 - \sigma_3^2 / \tilde{D}_x)} \left[\frac{2}{n} + \frac{D(\sigma_3^2)}{(\tilde{D}_x)^2} \right] + O(n^{-3/2}), \quad (8)$$

где \tilde{D}_x соответствует (4). Полученная формула (8) может быть доказана различными способами, в частности, на основе разложения оценки (6) в двумерный ряд Тейлора и общих свойств дисперсии. Отметим также, что параметры σ_3^2 и \tilde{D}_x определяются на основе данных из совершенно различных экспериментов, что позволяет (аналогично (3)) при выводе формулы (8) не учитывать «корреляционное» слагаемое.

Исходя из (6), (8), приходим к следующему прямому критерию проверки показателя точности поверяемого СИ:

$$\sigma \pm 3\sqrt{D(\sigma)} \leq \sigma_{\max}, \quad (5''')$$

где верхние знаки (включая знак равенства) соответствуют годному поверяемому СИ, а нижние – негодному. Этот критерий основан на том факте, что, в предположении нормального закона распределения оценки σ_3^2 , оценка (6) является асимптотически нормальной и асимптотически несмещенной с точностью до слагаемого $O(n^{-1})$.

Анализ формулы (8) показывает, что точность оценки (6) при возрастании n ограничена:

$$D(\sigma) \geq \frac{D(\sigma_3^2)}{4(\tilde{D}_x - \sigma_3^2)} \approx \frac{const}{(\sigma/\sigma_3)^2}. \quad (9)$$

Этот порог достигается практически (если принять в формуле (8) соотношение слагаемых 1:10) для числа отсчетов, равного

$$n_{\max} = \frac{20 \cdot (\tilde{D}_x)^2}{D(\sigma_3^2)}. \quad (10)$$

Таким образом, по мере уменьшения отношения σ/σ_3 (при фиксированных σ_3 и $D(\sigma_3^2)$) неизбежно увеличение уровня случайных погрешностей оценки (6).

Представляет интерес анализ поведения формулы (8) в зависимости от соотношения участвующих в ней параметров. Так, по мере уменьшения дисперсии $D(\sigma_3^2)$ убывает и дисперсия $D(\sigma)$, причем, как следует из (8), приблизительно линейно. В то же время, если увеличивается отношение СКО погрешностей двух сличаемых СИ σ/σ_3 , то относительная дисперсия $D(\sigma)/\sigma^2$ также ожидаемо убывает, оставаясь при этом ограниченной снизу значением $(2n)^{-1}$.

Поскольку оценка дисперсии по формуле (8) не использует в явном виде данные о соотношении точностей $k = \sigma/\sigma_3$ сличаемых СИ, введем нормировку:

$$\begin{cases} \varepsilon_3 = \sqrt{D(\sigma_3)} / E(\sigma_3) \\ \varepsilon = \sqrt{D(\sigma)} / E(\sigma) \end{cases}$$

где $E(\dots)$ – символ математического ожидания оценки, и преобразуем формулу (8) к виду:

$$\varepsilon = \varepsilon(k, \varepsilon_3) = \frac{1}{k^2} \sqrt{\frac{1}{2n} (1+k^2)^2 + \varepsilon_3^2} + O(n^{-3/2}). \quad (8')$$

Выражение (8') представляет собой относительную точность получаемой оценки (6) СКО погрешности поверяемого СИ в явной зависимости от соотношения точностей k поверяемого СИ и эталона, что позволяет определить допустимые пределы для указанного соотношения.

Достаточно полное представление о поведении оценки ε дают зависимости, представленные на рис. 1а–1в, где обозначениям $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ соответствуют $\varepsilon_3, \varepsilon$.

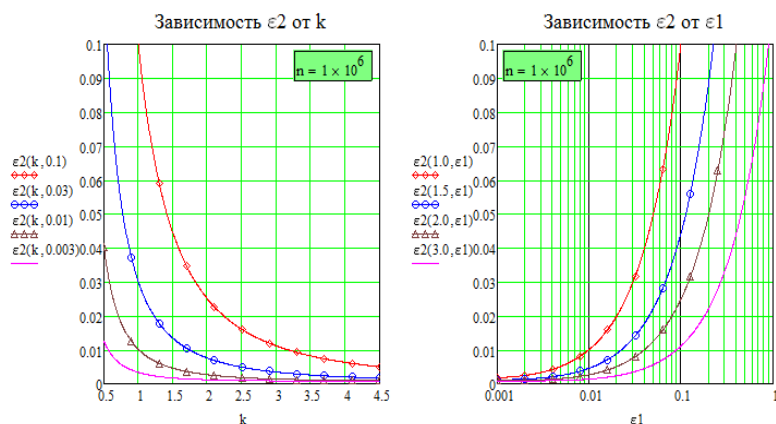


Рисунок 1а - Зависимости $\varepsilon_2(k)$ и $\varepsilon_2(\varepsilon_1)$ при $n=10^6$

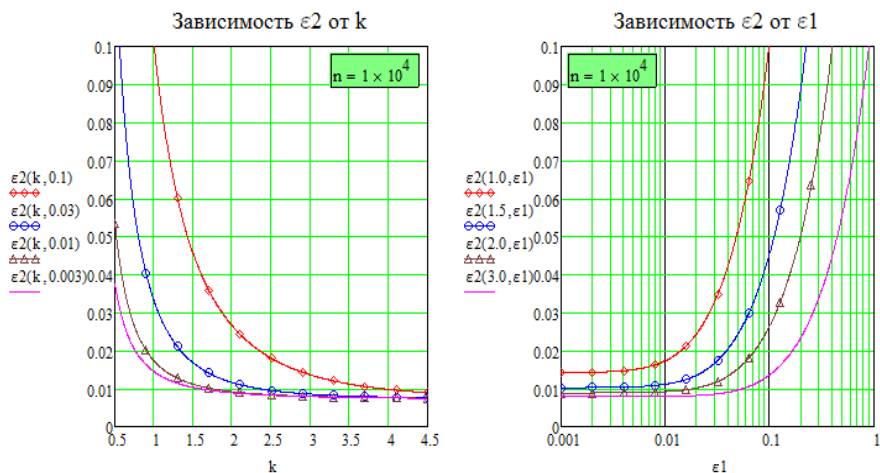


Рисунок 16 - Зависимости $\varepsilon_2(k)$ и $\varepsilon_2(\varepsilon_1)$ при $n=10^4$

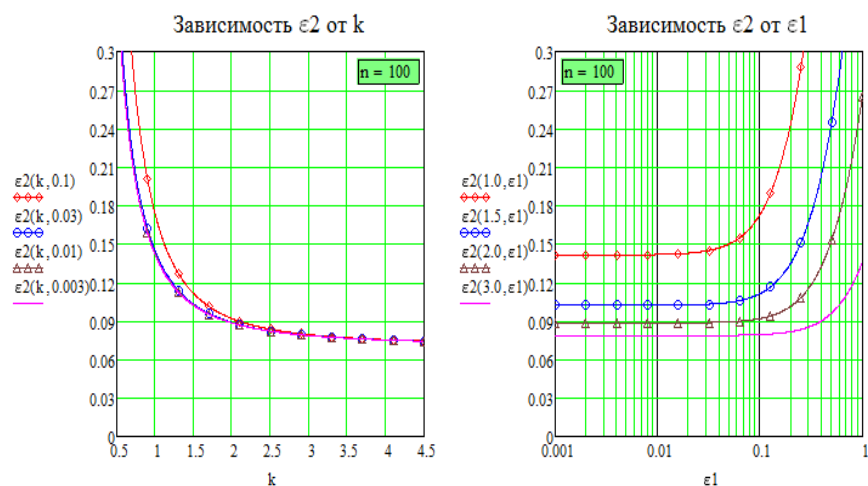


Рисунок 17 - Зависимости $\varepsilon_2(k)$ и $\varepsilon_2(\varepsilon_1)$ при $n=10^2$

Полезно отметить также, что после введения относительных показателей точности ε_s и ε прямой критерий (5''') существенно упрощается, а именно: если точность оценки (6) обеспечена на уровне $\varepsilon \leq |\sigma_{\max}/\sigma - 1|/3$, то поверяемое СИ признается годным или негодным в зависимости от выполнения $\sigma < \sigma_{\max}$ или $\sigma \geq \sigma_{\max}$. Если же ε превосходит указанный порог, то данный критерий неприменим, поскольку σ попадает в его зону нечувствительности $\sigma_{\max} \pm 3\sqrt{D(\sigma)}$.

При этом для уменьшения ε до приемлемого уровня, как показывают графики на рис. 1, следует увеличить объем поверки n в сочетании с соответствующим варьированием параметров k , ε_s (при условии возможности выбора подходящего эталона и проведения его надлежащей аттестации).

Что касается доверительных границ полной погрешности поверяемого СИ, то они равны $\pm 3\sigma$ ($P=0,997$), где σ – оценка (6).

Таким образом, для рассмотренной выше имеющейся в наличии априорной информации (вариант 1 таблицы 1) задача оценивания неизвестного параметра σ , в предположении справедливости гауссовой модели (2), полностью решается с помощью формул (4), (6), (8).

Ниже рассмотрены также основные случаи нарушения предположения о гауссовости распределений случайных погрешностей одного или обоих сличаемых СИ.

1.2. Если отсутствует возможность установить, что погрешность поверяемого СИ имеет гауссово распределение, и существует лишь некоторый интервал $[-\Delta, \Delta]$, в котором находятся ее реализации, вместо модели (2) следует использовать модель:

$$\begin{cases} \varphi_s(t) = \varphi_0(t) + \xi_s(t), & \xi_s(t) \sim N(0, \sigma_s^2) \text{ при любом } t=t_i; \\ \varphi(t) = \varphi_0(t) + \xi(t), & \xi(t) \sim U(-\Delta, \Delta) \text{ при любом } t=t_i, \end{cases} \quad (2a)$$

где $U(-\Delta, \Delta)$ – равномерное¹ распределение вероятностей погрешности поверяемого СИ, Δ – предел модуля погрешности (который не должен превосходить заданной нормативной погрешности Δ_{\max}). При этом для единообразия применяемых статистических методов вместо параметра Δ ниже будем рассматривать эквивалентное ему СКО равномерного распределения $\sigma = \Delta/\sqrt{3}$ с соответствующей нормой $\sigma_{\max} = \Delta_{\max}/\sqrt{3}$.

В этом случае остаются в силе выражения (3)–(6), однако соотношения (7)–(10) требуют пересмотра на основе построения композиции нормального и равномерного распределений (2а). При этом в качестве достоверного предела СКО погрешности поверяемого СИ, как правило, целесообразно выбрать ее нормативный предел σ_{\max} . Однако в случае, если полученный по результатам действительный предел σ оказался существенно меньше нормативного, то его использование вместо σ_{\max} , как уже обсуждалось выше, является более обоснованным.

Формула (7) уточняется на основе общего выражения для дисперсии оценки (4) в случае произвольного распределения [7]:

$$D(\tilde{D}_x) = n^{-1}(\mu_4 - \mu_2^2) + O(n^{-2}), \quad (11)$$

где μ_j – j -й центральный момент ($j = 2, 4$) распределения разностей отсчетов x_i показаний сличаемых СИ. В условиях (2а) плотность указанного распределения задается композицией нормального и равномерного распределений и равна [7, 8]:

$$p(x) = \frac{1}{2\sqrt{3}\sigma} \cdot \left[F_0\left(\frac{x + \sqrt{3}\sigma}{\sigma_s}\right) - F_0\left(\frac{x - \sqrt{3}\sigma}{\sigma_s}\right) \right], \quad (12)$$

где σ, σ_s – определены выше, $F_0(\dots)$ – функция стандартного гауссова распределения. Вычислив моменты плотности $p(x)$ и подставив их в (11), получим следующую модификацию формулы (7):

$$D(\tilde{D}_x) = \frac{2}{n} \left((\tilde{D}_x)^2 - \frac{3}{5} \sigma^4 \right) + O(n^{-2}). \quad (7a)$$

Анализируя эту формулу, следует специально отметить, что в рамках модели (2а) фактическая дисперсия оценки \tilde{D}_x может быть значительно меньше значения, получаемого на основе модели (2) (в случае ее принятия), особенно при существенно различных σ_s и σ . Так, при $k \approx 3$ оценка (7а) вдвое меньше оценки (7). Таким образом, недостаточно обоснованный выбор моделей погрешностей сличаемых СИ может привести к ошибочным оценкам достоверности полученных результатов поверки.

Далее, опираясь на (7а), получаем следующую модифицированную оценку дисперсии оценки (6):

$$D(\sigma) = \frac{\tilde{D}_x}{4(1 - \sigma_s^2/\tilde{D}_x)} \left[\frac{2}{n} \left(1 - \frac{3}{5} \cdot \frac{\sigma^4}{(\tilde{D}_x)^2} \right) + \frac{D(\sigma_s^2)}{(\tilde{D}_x)^2} \right] + O(n^{-3/2}), \quad (8a)$$

из которой получаем выражение (9а), совпадающее с (9), а также

$$n_{\max} = \frac{20 \cdot (\tilde{D}_x)^2}{D(\sigma_s^2)} \left(1 - \frac{3}{5} \cdot \frac{\sigma^4}{(\tilde{D}_x)^2} \right). \quad (10a)$$

Соответственно, остаются в силе и сделанные выше выводы с учетом отличий, полученных в формулах (7а)–(10а). Кроме того, может быть при необходимости модифицирован критерий (5) в обеих приведенных выше формах.

Доверительные границы полной погрешности поверяемого СИ в данном случае равны $\pm\sqrt{3}\sigma$ ($P=0,997$), где σ – оценка (6).

1.3. Если погрешность эталона задана своими границами $\pm\Delta_s$, аналогично (2а) имеем:

$$\begin{cases} \varphi_s(t) = \varphi_0(t) + \xi_s(t), & \xi_s(t) \sim U(-\Delta_s, \Delta_s) \text{ при любом } t=t_i; \\ \varphi(t) = \varphi_0(t) + \xi(t), & \xi(t) \sim N(0, \sigma^2) \text{ при любом } t=t_i, \end{cases} \quad (26)$$

где $\sigma_s = \Delta_s/\sqrt{3}$ – известно; σ – подлежит оцениванию. Для этого случая, как и выше, могут быть получены модифицированные формулы (56)–(106).

Доверительные границы полной погрешности поверяемого СИ в данном случае совпадают с таковыми для условий раздела 1.1.

1.4. В отсутствие оснований для описания погрешности обоих сличаемых СИ с помощью гауссова распределения следует также использовать равномерное распределение, аналогично моделям (2а) и (2б):

¹ Если погрешность задана своими пределами, то наилучшим среди одномодальных является именно равномерное распределение [9].

$$\begin{cases} \varphi_3(t) = \varphi_0(t) + \xi_3(t), & \xi_3(t) \sim U(-\Delta_3, \Delta_3) \text{ при любом } t=t_i; \\ \varphi(t) = \varphi_0(t) + \xi(t), & \xi(t) \sim U(-\Delta, \Delta) \text{ при любом } t=t_i, \end{cases} \quad (2в)$$

где $\sigma_3 = \Delta_3 / \sqrt{3}$ – известно; $\sigma = \Delta / \sqrt{3}$ – подлежит оцениванию. Здесь также можно получить модифицированные формулы (5в)–(10в).

Доверительные границы полной погрешности поверяемого СИ в данном случае совпадают с таковыми для условий раздела 1.2.

Таким образом, в рассмотренных случаях нарушения предположения о гауссовости распределений случайных погрешностей сличаемых СИ сохраняется вывод о разрешимости задачи оценивания неизвестного параметра σ для варианта 1 таблицы 1 с помощью формул (4), (6), (8) или их модификаций, аналогичных (8а). Доверительные границы полной погрешности поверяемого СИ могут быть найдены по формулам, указанным выше.

2. Наличие у эталона только случайных ($a_3 = 0$), а у поверяемого СИ как случайных, так и неизвестных постоянных систематических искажений сигналов: $a = \text{const}$ (вариант 2 таблицы 1).

Под указанными искажениями понимается как неточная начальная выставка нуля, так и постоянная погрешность при конкретном включении поверяемого СИ. При этом, если обработке подвергаются данные, полученные в нескольких включениях, то предполагается постоянство параметра a от включения к включению. Таким образом, в качестве базовой принимается следующая смещенная стохастическая модель с гауссовым распределением погрешностей:

$$\begin{cases} \varphi_3(t) = \varphi_0(t) + \xi_3(t), & \xi_3(t) \sim N(0, \sigma_3^2) \text{ при любом } t=t_i; \\ \varphi(t) = \varphi_0(t) + \xi(t), & \xi(t) \sim N(a, \sigma^2) \text{ при любом } t=t_i, \end{cases} \quad (2г)$$

в предположении, что показания сличаемых СИ считаются некоррелированными: $\text{cov}[\xi_3(t), \xi(t)] = 0$ при любом $t=t_i$. При этом математическое ожидание a – неизвестно, однако интересует нас, как правило, не само по себе, а с точки зрения корректного оценивания как СКО σ , так и границ доверительного интервала $\{a \pm K(P) \cdot \sigma; P, F\}$ полной погрешности поверяемого СИ (при $F = N$).

Очевидно, что в этих предположениях для дисперсий по-прежнему справедливо соотношение (3), а значит – (6). При этом по причине постоянства сдвига a параметр D_x допускает оценивание по той же формуле (4). А поскольку формула (7) носит универсальный характер, то оценка дисперсии оценки (6) – формула (8) – также остается в силе. Следует добавить, что критериальные выражения (5) могут быть модифицированы с учетом условий данного раздела.

Кроме того, возвращаясь к формуле (4), заметим, что использованное в ней выражение для \bar{x} является оценкой сдвига нуля a поверяемого СИ. Таким образом, доверительные границы $a \pm K(P) \cdot \sigma$ его полной погрешности в этом случае равны ($P=0,997$)

$$\begin{cases} \Delta_{\text{дов, н}} = \bar{x} - 3 \cdot \sqrt{\tilde{D}_x - \sigma_3^2} \\ \Delta_{\text{дов, в}} = \bar{x} + 3 \cdot \sqrt{\tilde{D}_x - \sigma_3^2}. \end{cases} \quad (13)$$

Случаи распределений погрешностей, отличных от гауссовых, могут быть рассмотрены аналогично 1.2–1.4, с последующим внесением соответствующих корректив в коэффициент $K=3$ при оценке СКО σ в формулах (13).

3. Наличие у эталона только случайных ($a_3 = 0$), а у поверяемого СИ – случайных и постоянных систематических искажений сигналов, причем последние могут изменяться от включения к включению: $a \in [a_n, a_v]$ (вариант 3 таблицы 1).

В данном случае для решения задачи обработки данных, полученных путем сличений СИ, следует (и возможно) использовать изложенную выше методологию разделов 1 и 2. Если требуется оценить только СКО σ , то необходимо m раз повторить вариант 2 (при различных a) и взять наихудшие из оценок по формулам (4), (8). Если же нас интересует полная погрешность, то ищем доверительные границы вида $a \pm K(P) \cdot \sigma$ (также наихудшие для m включений поверяемого СИ), где коэффициент $K(P)$ соответствует нормальному (аналогично разделам 1.1, 1.3) или равномерному (аналогично разделам 1.2, 1.4) распределениям.

Модельный пример обработки данных сличений СИ

Развитый выше подход к оцениванию точности поверяемого СИ путем его сличений с эталоном иллюстрируется результатами следующего модельного эксперимента.

С помощью датчика случайных чисел, распределенных по нормальному закону, генерированы две выборки объемом n каждая с заданными СКО, соответственно, $\sigma=1$ и $\sigma_3=0,67$, при их отношении $k=1,5$. Далее образована разностная выборка, по которой оценено СКО σ в предположении точно известного (заданного) σ_3 . Далее, для заданного ε_3 , рассчитаны теоретическое (по формуле (8')) и модельное (по формулам (6)-(8)) значения ε . Расчеты проведены для двух значений $n = 100; 10^6$ и двух значений $\varepsilon_3 = 0,3; 0,001$. Для придания сравнению значений ε статистического смысла указанная процедура повторена 20 раз для каждой пары $\{\varepsilon_3, n\}$. В результате получены граничные модельные значения ε , относительно которых теоретическое значение имеет смысл математического ожидания. Данные эксперимента сведены в таблицу 2.

Кроме того, для сравнения приведены также результаты аналогичного моделирования для $k=3$ (что традиционно считается заведомо достаточным для достоверности сличений) и для $k=1$, при этом было сохранено исходное значение СКО поверяемого СИ $\sigma=1$.

Таблица 2

k	ε_3	$n = 100$			$n = 10^6$		
		Оценка σ	Модельное ε	Теоретическое ε	Оценка σ	Модельное ε	Теоретическое ε
1,0	0,3	1±0,91	0,26 ... 0,52	0,33	1±0,82	0,298 ... 0,301	0,3000
	0,001	1±0,32	0,12 ... 0,19	0,14	1±0,0041	0,001725 ... 0,001736	0,001732
1,5	0,3	1±0,45	0,14 ... 0,23	0,17	1±0,34	0,133 ... 0,134	0,1333
	0,001	1±0,27	0,09 ... 0,12	0,10	1±0,0023	0,001112 ... 0,001116	0,001114
3,0	0,3	1±0,21	0,083 ... 0,095	0,085	1±0,08	0,0333 ... 0,0334	0,03334
	0,001	1±0,17	0,077 ... 0,082	0,079	1±0,0015	0,000793 ... 0,000794	0,0007935

В таблице 2 выбранные значения n и ε_3 охватывают каждый довольно широкий (близкий к практически предельному) диапазон. Видно, что средние (по повторным выборкам) значения оценок СКО σ поверяемого СИ практически совпадают с заданным перед моделированием значением $\sigma=1$. При этом степень их разброса ожидаемо уменьшается по мере роста n и уменьшения ε_3 . Важно, что теоретические значения введенного в рассмотрение в данной статье показателя точности ε действительно близки к средним выборочным модельным значениям, причем они тем ближе, чем меньше разброс выборочных значений, а последнее прямо связано с ростом n и уменьшением ε_3 , что совершенно естественно.

Заметим при этом, что удовлетворительные по точности оценки σ получены при отношении $k=1,5$, которое традиционно считается недопустимо малым. Более того, если доступен эталон, аттестованный с относительной погрешностью $\varepsilon_3 \leq 0,01$, а также допустимо увеличение объема поверки до $n \geq 10^4$, то соотношение $k=1$ также дает вполне приемлемые результаты с относительной погрешностью $\varepsilon < 0,02$. Другими словами, путем варьирования одновременно всех трех параметров $\{n, \varepsilon_3, k\}$ мы получаем возможность перераспределять их вклад в результирующую точность оценки целевого параметра σ в соответствии с формулой (8').

Таким образом, можно констатировать, что модельный эксперимент подтвердил хорошее согласие полученных в работе выводов с положенными в их основу предположениями.

Заключение

Анализ и формализация процедуры поверки/калибровки СИ путем его сличений с эталоном показывают, что эта задача, принципиально, может быть решена, т.е., оценки характеристик погрешности поверяемого/калибруемого СИ могут быть получены с требуемым качеством. Традиционное условие эталонирования как определенное соотношение точностей эталонного и поверяемого СИ уточнено и расширено. Показано, что необходимым и достаточным условием решения задачи служит наличие оценок характеристик погрешности эталона, точность которых не ниже определенного уровня, который зависит от соотношения точностей сличаемых СИ. Это позволяет существенно расширить диапазон приемлемых соотношений точности в сторону его понижения. Полученные теоретические соотношения и зависимости могут служить основой для разработки методик поверки СИ для конкретных видов измерений и, при определенных в работе условиях, позволяют решить практически проблему эталонирования.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00082).*

Литература

1. ГОСТ 8.017-79. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений избыточного давления до 250 МПа.
2. ГОСТ 8.558-2009. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры.
3. ГОСТ 8.569-2000. ГСИ. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02–178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки.
4. ГОСТ Р 50856-96 Измерители скорости движения транспортных средств радиолокационные. Общие технические требования. Методы испытаний.
5. МИ 2573-2000. ГСИ. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. Методика поверки. Общие положения.
6. **Маликов, М. Ф.** Основы метрологии. – М.: Коммерприбор. – 1949.
7. **Крамер Г.** Математические методы статистики. – М.: ИЛ. – 1948.
8. **Грановский, В. А., Сирая, Т. Н.** Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
9. **Rabinovich, S. G.** Measurement errors and uncertainties: theory and practice – 2nd ed./ Springer-Verlag, N.Y., 2000.

КАЧЕСТВО КАЛИБРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ: РЕГРЕССИОННЫЕ И КОНФЛЮЕНТНЫЕ МЕТОДЫ

М. Д. Кудрявцев¹, Т. Н. Сирая²

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ,
(812) 499-83-37, e-mail: elprib@online.ru

Аннотация

Ключевые слова: преобразователь, калибровочная характеристика, погрешность, метод наименьших квадратов, конфлюентный метод

Рассматриваются вопросы обеспечения качества алгоритмов построения калибровочных (градуировочных) характеристик (ГХ) измерительных и навигационных преобразователей. Рассмотрены как классические алгоритмы наименьших квадратов, оптимальные лишь при строгой регрессионной модели, так и конфлюентные оценки, сохраняющие статистическую состоятельность в рамках расширенных конфлюентных моделей. Поскольку для построения конфлюентных оценок необходима дополнительная информация о данных, выделены основные варианты такого рода информации, доступные в измерительной и навигационной практике. Полученные конфлюентные оценки ГХ сопоставляются по точности с классическими МНК-оценками.

Введение

В связи с повышением требований к качеству навигационной аппаратуры и к точности выработки навигационных параметров, расширяются области применения разнообразных измерительных и навигационных преобразователей. Соответственно, развивается метрологическое обеспечение указанных преобразователей; все более актуальными становятся вопросы обеспечения качества их метрологических характеристик (МХ). Поэтому задачи нормирования, определения и контроля калибровочных или градуировочных характеристик (ГХ) измерительных и навигационных преобразователей становятся все более значимыми.

ГХ традиционно являются важным классом метрологических характеристик (МХ) средств измерений (СИ), и в особенности – измерительных преобразователей (ИПр); в связи с этим методам построения ГХ уделяется большое внимание в статистической и метрологической литературе [1–6], а также в нормативных документах. При расширении области анализа и включении в нее навигационных преобразователей (НПр), прежде всего, используются методы определения и контроля ГХ, разработанные для ИПр; однако они не всегда позволяют решать задачи в полном объеме и нередко требуют модификации. Таким образом, наблюдается существенное расширение и усложнение задач, что обуславливает и необходимость расширения методов определения и контроля ГХ.

Качество построенных ГХ существенно влияет на точность измерений или достоверность контроля, что обуславливает значимость выбора алгоритмов построения ГХ и оценивания погрешностей построенных ГХ.

Традиционно при построении ГХ основными являются регрессионные методы, прежде всего – классический метод наименьших квадратов (МНК) [1], который дает оптимальные оценки в случае строгой регрессионной модели (в частности, если аргументы X_i известны точно). При нарушении указанных условий МНК-оценки оказываются несостоятельными. На практике необоснованное применение МНК приводит к менее точным оценкам, но еще важнее то, что МНК-оценки ГХ в этих случаях являются смещенными, а оценки погрешностей построенных ГХ получаются существенно ошибочными (заниженными). Таким образом, качество построенной ГХ существенно зависит от принятой модели.

В современной прикладной статистике при нарушении регрессионной модели рекомендуется использовать другие методы построения ГХ, прежде всего – конфлюентные алгоритмы [2, 3, 6]. Особенностью конфлюентных методов является то, что они позволяют получать статистически состоятельные оценки ГХ и адекватные оценки их точности, однако в них необходимо использовать разнообразную дополнительную (априорную) информацию о данных.

В настоящем докладе рассмотрены основные варианты информации о данных, доступные в измерительной и навигационной практике, то есть, формируются основные виды конфлюентных моделей. Приводятся общие рекомендации по выбору алгоритмов построения ГХ для каждого из вариантов.

Подробнее рассматриваются вопросы качества полученных ГХ. При построении конфлюентных оценок в качестве основного критерия используется условие состоятельности как асимптотическое

¹ Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

² Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

свойство оценок ГХ. При оценивании погрешностей построенных ГХ для различных вариантов априорной информации учитываются как случайные, так и систематические составляющие погрешностей данных. Полученные оценки ГХ сопоставляются по точности с классическими МНК-оценками.

1 Регрессионные и конфлюентные модели

Предполагается, что искомая ГХ, выражающая зависимость между входными и выходными величинами, может быть представлена в аналитическом виде:

$$Y = f(X) = f(X, a_1, \dots, a_k), \quad (1)$$

где X и Y – входные и выходные величины,

f – функция определенного вида от k параметров, которые подлежат оцениванию.

Набор экспериментальных данных, используемый для построения функции (1)

$$\{x_{ij}, y_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\} \quad (2)$$

может быть представлен в рамках различных вероятностных (статистических) моделей.

Исходной является классическая регрессионная модель

$$\Omega(R_0) = \{x_{ij} = X_i, y_{ij} = f(X_i) + \xi_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\}, \quad (3)$$

где X_i и $Y_i = f(X_i)$ – истинные значения входных и выходных величин;

ξ_{ij} – погрешности измерений (определения) данных y_{ij} .

В математической статистике обычно предполагают, что погрешности ξ_{ij} – случайные величины, но в измерительных задачах необходимо учитывать также и систематические θ_{yi} составляющие погрешности, то есть рассматривается полная модель погрешности:

$$\xi_{ij} = \theta_{yi} + \varepsilon_{ij}^y, \quad (4)$$

где ε_{ij}^y – случайные составляющие,

θ_{yi} – систематические составляющие.

Известно, что в рамках регрессионной модели $\Omega(R_0)$ и при гауссовском распределении случайных погрешностей ξ_{ij} , следует использовать классический МНК [1–4]. Это обеспечит оптимальные (в смысле несмещенности и минимума дисперсии) оценки, которые, в том числе, являются и статистически состоятельными.

Кроме того, МНК-оценки сохраняют эффективность и при наличии систематических составляющих.

Поскольку регрессионные модели не всегда выполняются на практике, необходимо также рассматривать модели данных, допускающие наличие погрешностей в аргументах X_i . Таким образом, общая конфлюентная модель может быть представлена следующим образом:

$$\Omega(C_0) = \{x_{ij} = X_i + \eta_{ij}, y_{ij} = f(X_i) + \xi_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\} \quad (5)$$

где η_{ij} – погрешности данных x_{ij} , которые аналогично (4) разбиваем на ε_{ij}^x – случайные составляющие и θ_{xi} – систематические составляющие.

Однако в условиях этой общей модели $\Omega(C_0)$, классические МНК-оценки оказываются несостоятельными, то есть, они имеют асимптотические смещения (даже при большом числе наблюдений).

Например, для самого простого, но практически весьма важного случая линейной функции:

$$Y = a + bX \quad (6)$$

МНК-оценка коэффициента b имеет асимптотическое смещение:

$$B(b) = M(b) - b \approx -b \sigma_x^2 / (\tau_n + \sigma_x^2), \quad (7)$$

где параметр $\tau_n = \sum(x_i - \bar{x})^2 / n$ отражает расположение точек X_i в диапазоне. При этом в рамках естественного предположения, что эти точки не сконцентрированы в окрестности одной точки, имеем $\tau_n \rightarrow \tau > 0$.

Таким образом, в рамках общей модели $\Omega(C_0)$ даже при отсутствии систематических погрешностей данных, появляется систематический сдвиг оценки коэффициента b . К сожалению, в рамках общей конфлюентной модели $\Omega(C_0)$, то есть, без привлечения дополнительной информации вообще не удастся получить статистически состоятельные оценки.

Следовательно, целесообразно использовать различные конфлюентные оценки в рамках более узких моделей данных, которые позволяют обеспечить состоятельность оценок. При этом необходимо учитывать два обстоятельства. Во-первых, для получения состоятельных оценок в конфлюентных методах требуется использовать дополнительную информацию о данных, которая может быть доступна на практике. Во-вторых, такие методы первоначально (и преимущественно) разрабатывались для специальных областей приложений (включая социально-экономические и медико-биологические исследования) [2, 6]. В этих областях имеется существенная специфика условий построения и применения ГХ; следовательно, виды априорной информации и свойства данных могут отличаться от тех, которые характерны для измерительных задач. Поэтому необходимо выбирать те варианты информации, которые доступны в измерительной и навигационной практике, и далее на ее основе строить соответствующие оценки.

Таким образом, необходимо построить семейство конфлюентных моделей, которые являются корректными в том смысле, что позволяют гарантированно получить состоятельные оценки.

Прежде всего, корректная конфлюентная модель $\Omega(C_p)$ является расширением регрессионной модели $\Omega(R_0)$, в том смысле, что она допускает наличие погрешностей в аргументах X_i . Однако она является сужением общей конфлюентной модели $\Omega(C_0)$, поскольку должна содержать дополнительную информацию о данных или ограничения на параметры или свойства погрешностей. Следовательно, должно быть выполнено соотношение вида:

$$\Omega(R_0) \subset \Omega(C_p) \subset \Omega(C_0). \quad (8)$$

В частности, выражение для систематического сдвига (смещения) МНК-оценки (7) подсказывает один из возможных способов получения корректного расширения модели, а именно, путем задания дисперсии погрешностей. Действительно, модель вида:

$$\Omega(C_{pl}) = \{x_{ij} = X_i + \theta_{xi} + \varepsilon_{xij}, y_i = f(X_i) + \theta_{yi} + \varepsilon_{yij}^v, D(\varepsilon_{xij}) = \sigma_x^2\}$$

оказывается корректной конфлюентной моделью, в рамках которой существуют модифицированные МНК-оценки, являющиеся состоятельными.

Другой вид дополнительной информации о свойствах данных может быть связан с расположением точек X_i по диапазону и планированием эксперимента. В общем случае, модели на основе планируемого эксперимента в конфлюентном анализе являются предпочтительными, поскольку они содержат или позволяют получать дополнительную информацию о данных, которая необходима для получения состоятельных оценок.

Далее рассмотрены основные варианты информации о данных, которые могут быть доступны в измерительной и навигационной практике, и приводятся соответствующие группы конфлюентных оценок.

2 Основные группы конфлюентных моделей и методов

Выделяются следующие группы корректных конфлюентных моделей, которые используют доступную в измерительной практике дополнительную информацию о данных и позволяют получить состоятельные оценки ГХ.

а) Измерения входной и выходной переменных выполняются с повторными наблюдениями в точках

$$\Omega_a = \Omega\{C_p | x_{ij}, y_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\}.$$

б) Известна оценка дисперсии погрешностей одной из двух переменных, $D(\xi)$ или $D(\eta)$ (которая может быть задана априори или оценивается в независимой серии экспериментов):

$$\Omega_{bx} = \Omega\{C_p | D(\eta) = \sigma_x^2\} \text{ или } \Omega_{by} = \Omega\{C_p | D(\xi) = \sigma_y^2\}.$$

в) Известно отношение дисперсий погрешностей переменных: $\lambda = D(\xi) / D(\eta)$ (которое задано априори или оценено в независимой серии экспериментов):

$$\Omega_c = \Omega\{C_p | \lambda = D(\xi) / D(\eta)\}.$$

д) Известен (задан априори или получается из физических условий опыта) порядок возрастания истинных значений аргумента X_i :

$$\Omega_d = \Omega\{C_p | X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n\}.$$

Кроме того, для некоторых классов функций (в том числе, для линейных) приемлемые конфлюентные модели можно получать на основе планируемого эксперимента, но затем свести модель к регрессионному виду путем, так называемого, приведения погрешностей к правой части [3, 7].

В общем случае конфлюентные оценки в вычислительном плане оказываются более сложными, чем регрессионные оценки (в частности, МНК-оценки), и их не всегда удастся представить в явном виде. Однако для отмеченного выше случая линейной ГХ (6) наиболее простые конфлюентные оценки можно получить в виде замкнутого выражения.

В качестве примера далее для перечисленных выше конфлюентных моделей приводятся соответствующие оценки коэффициента b в случае линейной ГХ (6).

Прежде всего, в рамках моделей вида Ω_a и Ω_b можно получать различные конфлюентные оценки как модификации МНК-оценок, с учетом заданных (или получаемых из повторных наблюдений) дисперсий погрешностей.

1) В рамках модели вида Ω_a (при повторных наблюдениях в точках) можно получить модифицированную МНК-оценку вида:

$$b_1 = \pm[(\sum_y - (n-1) S_y^2) / (\sum_x - (n-1) S_x^2)]^{1/2},$$

где S_x^2, S_y^2 – оценки дисперсий погрешностей, полученные по многократным наблюдениям в точках; $\sum_x = \sum (x_i - \bar{x})^2$, $\sum_y = \sum (y_i - \bar{y})^2$ – суммы квадратов отклонений средних значений,

x_i, y_i – средние значения по группам данных,

\bar{x}, \bar{y} – общие средние.

2) В рамках моделей Ω_{bx} или Ω_{by} также можно получить модифицированные МНК-оценки, используя известные дисперсии погрешностей, σ_x^2 или σ_y^2 :

$$b_2 = \sum_{xy} / (\sum_x - (n-1) \sigma_x^2), \quad b_3 = (\sum_y - (n-1) \sigma_y^2) / \sum_{xy}$$

где $\sum_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$.

Приведенные выше оценки являются естественными модификациями классических МНК-оценок, однако, в отличие от них, являются состоятельными.

Принципиально другой вид, существенно отличающийся от МНК-оценок, имеют конфлюентные оценки, получаемые в рамках моделей Ω_c и Ω_d .

3) В рамках модели Ω_c можно использовать оценки ортогональной регрессии, основанные на известном отношении дисперсий λ :

$$b_o = v \pm (v^2 + \lambda)^{1/2}, \quad v = (\sum_y - \lambda \sum_x) / 2 \sum_{xy}$$

В частности, при $\lambda = 1$, то есть, при равнозначных измерениях входных и выходных величин, эту оценку можно было бы получить, по аналогии с МНК, из геометрического условия – минимума суммы квадратов расстояний от точек до прямой (по нормали к прямой):

$$\min Q_{ort} = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2 / (1 + b^2);$$

именно этим и обусловлено наименование оценки. В общем случае, при произвольном λ , следует минимизировать сумму квадратов расстояний с весами, зависящими от λ :

$$\min Q_{ort}(\lambda) = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2 / (\lambda + b^2).$$

4) В рамках модели Ω_d можно использовать дробно-линейные оценки, основанные на заданном порядке значений аргументов X_i :

$$b_w = \sum w_i y_i / \sum w_i x_i$$

где w_i – постоянные веса, причем $\sum w_i = 0$.

Отметим, что при попытке найти оптимальные веса для дробно-линейных оценок были бы получены значения: $w_i = x_i - \bar{x}$, то есть, при точно известных значениях x_i (что соответствует строгой регрессионной модели) получаются классические МНК-оценки.

Приведенные выше оценки коэффициента b для линейной модели (6) получаются в явном виде и довольно просты. Большинство из них (кроме последних, дробно-линейных) по виду близки к МНК-оценкам, но отличаются от последних тем, что состоятельны при заданных условиях.

Разумеется, и в случае нелинейных ГХ вида (1) в рамках приведенных выше конфлюентных моделей можно аналогичным образом получить соответствующие состоятельные оценки. Однако представить их в явном виде обычно не удастся, и оценки получаются с использованием итерационных или других численных методов.

Кроме указанных групп конфлюентных оценок имеются также и другие, использующие отличные виды дополнительной информации о данных [2, 3]. Например, в социально-экономических и медико-биологических приложениях широко используются, так называемые, методы инструментальных переменных [2]. Однако указанные подходы менее отвечают особенностям измерительных и навигационных задач, и потому здесь не рассматриваются.

3 Сопоставление конфлюентных методов построения ГХ

Прежде всего, необходимо рассмотреть характеристики точности конфлюентных оценок, учитывая как случайные, так и систематические составляющие погрешностей данных.

Основными характеристиками точности оценок являются смещение и дисперсия. При этом следует рассмотреть два основных случая:

- α) асимптотический случай, когда число данных может быть велико;
- β) умеренное (или небольшое) число данных, что наиболее часто встречается на практике.

В настоящее время лучше изучены асимптотические свойства конфлюентных оценок; в частности, основным критерием при их построении является состоятельность, то есть, асимптотическая несмещенность оценки.

В качестве примера в Табл. 1 приводятся асимптотические смещения и дисперсии ряда конфлюентных оценок параметра b , перечисленных выше. В табл. 1 также указана дополнительная информация, используемая при получении оценок; для сравнения приводится также МНК-оценка.

Таблица 1 - Асимптотические характеристики конфлюентных оценок коэффициента b линейной ГХ

Априорная информация		Оценка	Смещение $B(b)$	Дисперсия $D(b)$
Известные параметры (дисперсии)	$\lambda = \sigma_y^2 / \sigma_x^2$ (или оценка)	b_0	$\frac{2\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{b \sum x}$	$\frac{\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{\sum x}$
	σ_x^2 (оценка)	b_2	$2 b \sigma_x^2 / \sum x$	
	σ_y^2 (оценка)	b_3	$(b^2 - \lambda) b \sigma_x^2 / b^2 \sum x$	
Многочисленные наблюдения в точках	S_x^2, S_y^2	b_1	$\left(1 - \frac{\lambda}{b^2}\right) \frac{b \sigma_x^2}{2 \sum x}$	$\frac{\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{\sum x}$
	S_x^2	b_2	$B(b_2)$	
	S_y^2	b_3	$B(b_3)$	
	$\lambda^* = S_y^2 / S_x^2$	b_0	$B(b_0)$	
Упорядочение входных величин	Порядок $X_1 \leq \dots \leq X_n$	b_w	$\frac{b \sigma_x^2 W^2}{W(X)}$	$\frac{\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{W^2(X)} W^2$
Нет априорной информации		МНК-оценка $b_{LS} = \sum_{xy} / \sum x$	$-\frac{b \sigma_x^2 (n-3)}{\sum x}$	$\frac{\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{\sum x}$

Из табл. 1 видно, что приведенные выше конфлюентные оценки несколько различаются по смещениям, но все состоятельны (в отличие от МНК). С другой стороны, асимптотические дисперсии у них примерно одинаковы и близки к дисперсии МНК-оценки, которая составляет

$$\sigma^2(b_{LS}) = (\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2) / \sum x.$$

Несколько отличаются от остальных дробно-линейные оценки, для которых асимптотическая дисперсия имеет вид:

$$\sigma^2(b_w) = W^2 (\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2) / W_x^2.$$

где $W^2 = \sum w_i^2$, $W_x = \sum w_i x_i$.

Ниже в табл. 2 приведены варианты дробно-линейных оценок и их основные параметры [7].

Таблица 2 - Дробно-линейные оценки коэффициента b линейной функции

Априорная информация	Оценка	Смещение $B(b)$	Дисперсия $D(b)$
Порядок истинных значений $\{X_i\}$	$b = \frac{\sum \omega_i y_i}{\sum \omega_i x_i}$	$\frac{b \sigma_x^2 W^2}{W(X)}$	$\frac{\sigma_0^2 W^2}{W^2(X)}$
Разбиение $\{X_i\}$ на группы	$b_g = \frac{\sum n_i(N - 2N_i + n_i)\bar{y}_i}{\sum n_i(N - 2N_i + n_i)\bar{x}_i}$	—	—
Разбиение $\{X_i\}$ на 2 или 3 группы	$b_w = \frac{y^{II} - y^I}{x^{II} - x^I}$	$\frac{mb \sigma_x^2}{(x^{II} - x^I)^2}$	$\frac{m \sigma_0^2}{(x^{II} - x^I)^2}$
Равномерное расположение точек $\{X_i\}$ по диапазону	$b_H = \frac{\sum y_i(m+1-2i)}{\sum x_i(m+1-2i)}$	$\frac{12b \sigma_x^2}{h^2 m(m^2 - 1)}$	$\frac{12 \sigma_0^2}{h^2 m(m^2 - 1)}$

Поскольку на практике конфлюентные оценки приходится использовать при умеренных объемах данных, их характеристики следует также оценивать и в этих случаях (не только асимптотически). Для этого целесообразно использовать схему аттестации алгоритмов, разработанную в метрологии [8–10].

В соответствии со схемой аттестации алгоритмов, основные характеристики конфлюентных алгоритмов необходимо оценивать на унифицированных типовых моделях данных. В качестве основных характеристик таких алгоритмов следует использовать смещение и дисперсию, а также объединенную характеристику – второй начальный момент

$$M_2(b) = D(b) + B^2(b).$$

При этом в качестве типовых моделей целесообразно принять указанные выше модели $\Omega_a - \Omega_d$.

Характеристики алгоритмов оценивают либо аналитическими методами, либо путем статистического моделирования. Первый способ дает асимптотические значения характеристик (в частности, приведенные в табл. 1 асимптотические смещения и дисперсии оценок). Второй подход позволяет получать значения характеристик при умеренном объеме данных.

Таким образом, целесообразно выполнить метрологическую аттестацию широкого круга конфлюентных алгоритмов на специальных (унифицированных) типовых моделях – аналогично тому, как это было выполнено ранее для широкого набора оценок сдвига [5].

Существенная специфика данной задачи аттестации алгоритмов построения ГХ заключается в том, что конфлюентные модели резко индивидуальны и бывают тесно связаны с узкими классами или даже отдельными алгоритмами. Поэтому необходимо выбрать конструктивные типовые модели, которые с одной стороны, являются корректными, то есть, позволяют построить состоятельные алгоритмы, но в то же время, оказываются достаточно широкими, чтобы быть основой для сравнения группы алгоритмов.

Кроме указанных выше основных характеристик точности – смещения и дисперсии оценок – следует также оценивать и вычислительные затраты на реализацию оценок, аналогично тому, как это делается в [4] для МНК-оценок.

Следует отметить, что в случае малых выборок по результатам моделирования простые МНК-оценки ГХ иногда могут оказаться даже предпочтительными по точности. Это обусловлено тем, что свойство состоятельности является асимптотическим, а используемая дополнительная информация в таких условиях может иметь невысокую точность. Поэтому преимущества конфлюентных оценок могут проявляться лишь при больших объемах данных. Кроме того, соотношение качества оценок может зависеть и от конкретного расположения точек X_i по диапазону.

Такого рода исследования следует продолжить, чтобы сформулировать полезные практические рекомендации. В частности, представляется весьма перспективным изучение дробно-линейных оценок.

4 Обобщение: построение конфлюентных оценок для двумерных ГХ

Выше были достаточно детально рассмотрены классические калибровочные (градуировочные) характеристики, выражающие связь между величинами X и Y скалярного типа. Однако изложенные выше конфлюентные методы оценивания параметров указанных характеристик могут быть распространены и на связи между величинами более сложной природы, и в первую очередь – на векторные. Рассмотрим более подробно случай двумерных величин X и Y .

Пусть имеется конечная совокупность из n однотипных статических объектов $\{O_i\}$, которые могут быть однозначно идентифицированы своими номерами $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, и свойства которых с достаточной полнотой характеризуются с помощью некоторой двумерной числовой параметризации $\square: O_i \Rightarrow (x_i, y_i) \in S \subset R^2$. В этом контексте множество S , содержащее все точки-изображения объектов $\{(x_i, y_i)\}$, $i \in I$, будем называть *параметрическим носителем* объектов $\{O_i\}$, который предполагается связным и равномерно ограниченным (независимо от выбранных объектов). Таким носителем может быть, например, прямоугольная область, задаваемая экстремальными значениями $x_{\min/\max}$ и $y_{\min/\max}$, либо его можно построить на основе выпуклой оболочкой указанных точек-изображений. При дальнейшем изложении будем называть значения параметрических переменных (x, y) *основными координатами* рассматриваемой совокупности объектов. При этом для уверенной попарной различимости объектов (как точек введенного параметрического пространства) предполагается заданным порог $\rho_0 > 0$ такой, что $\rho(O_i, O_j) = \rho[(x_i, y_i), (x_j, y_j)] > \rho_0$ для любых $i, j \in I$, $i \neq j$, где ρ – некоторая метрика в R^2 (например, евклидова). Кроме того, протяженность носителя S будем характеризовать его диаметром, понимаемым как $d_S = \max\{\rho(O_i, O_j); i, j \in I\}$.

Координаты рассматриваемых объектов считаются *наблюдаемыми*, т.е. имеется некоторый экспериментальный (на основе доступных методик и средств измерений) или расчетный (на основе теоретического описания объектов и априорной информации) *способ оценивания* координат $\{(x_i, y_i)\}$ с известной точностью. При этом для формализации понятия точности будем использовать стохастическую модель, в рамках которой имеющиеся оценки $\{(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)\}$ координат предполагаются *несмещенными* (при многократном повторном оценивании), а в качестве показателей точности этих оценок используются *средние квадратические отклонения* (СКО) σ_x, σ_y их случайных погрешностей, в простейшем случае не зависящие от объекта. Более того, будем предполагать *нормальность* распределения указанных случайных погрешностей и их *взаимную некоррелированность* (как между двумя координатами (x, y) одного объекта, так и между различными объектами).

Пусть имеется также некоторая *альтернативная* параметризация указанной совокупности объектов $\square': O_i \Rightarrow (\xi_i, \psi_i) \in T \subset R^2$, $i \in I$, которая обладает всеми перечисленными выше свойствами основной параметризации \square . Соответственно, альтернативные координаты (ξ, ψ) также предполагаются *наблюдаемыми* (в указанном выше смысле), а точность их оценок $\tilde{\xi}, \tilde{\psi}$ характеризуют СКО σ_ξ, σ_ψ . Диаметр альтернативного носителя объектов T обозначим через $d_T = \max\{\rho[(\xi_i, \psi_i), (\xi_j, \psi_j)]\}$, где ρ – выбранная ранее метрика в R^2 . Потребуем «равномасштабности» двух параметризаций: $d_T = d_S$ (если это не так, пропорционально скорректируем альтернативные координаты (ξ, ψ) и СКО σ_ξ, σ_ψ их оценок). Предположим также, что существует некоторое гомеоморфное преобразование $\Phi: (x, y) \Rightarrow (\xi, \psi)$, которое связывает между собой «истинные» основные и альтернативные координаты (в случае, когда и те, и другие не отягощены погрешностями).

Рассмотрим ситуацию, когда как прямое преобразование Φ , так и обратное ему преобразование $\Phi^{-1}: (\xi, \psi) \Rightarrow (x, y)$ может зависеть от ряда внешних (по отношению к имеющейся совокупности объектов) неконтролируемых факторов. К числу последних следует отнести параметры, характеризующие условия подготовки к выполнению процедур измерения/вычисления основных и альтернативных координат, а также особенности ключевых элементов указанных процедур таких, как методические погрешности использованных методик измерений и/или теоретического описания объектов, включая степень их адекватности. Очевидно также, что в случае достаточно близкого взаимного расположения рассматриваемых объектов (т.е. при «малости» в том или ином смысле диаметров их носителей) преобразование Φ может проявлять себя как приблизительно *линейное* (при надлежащем выборе начал координат). Соответственно, для систем координат с произвольными началами будем иметь в качестве начального приближения к Φ *аффинное* преобразование.

Таким образом, в описанных выше предположениях ставится задача оптимального оценивания параметров двух преобразований Φ и Φ^{-1} в классе всех аффинных преобразований:

$$\Phi: \begin{cases} \tilde{\xi} \approx A_0 + A_1 \tilde{x} + A_2 \tilde{y} \\ \tilde{\psi} \approx B_0 + B_1 \tilde{x} + B_2 \tilde{y} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\Phi^{-1}: \begin{cases} \tilde{x} \approx C_0 + C_1 \tilde{\xi} + C_2 \tilde{\psi} \\ \tilde{y} \approx D_0 + D_1 \tilde{\xi} + D_2 \tilde{\psi} \end{cases} \quad (10)$$

при условии, что имеющиеся в наличии в качестве исходных данных оценки основных и альтернативных координат не зависят от времени (либо это мгновенные синхронные «снимки» рассматриваемых объектов) и измерены/вычислены с нормально распределенными и некоррелированными погрешностями:

$$(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i) \sim N(x_i, y_i; K_{xy}), (\tilde{\xi}_i, \tilde{\psi}_i) \sim N(\xi_i, \psi_i; K_{\xi\psi}), \quad i \in I. \quad (11)$$

Здесь (x_i, y_i) и (ξ_i, ψ_i) являются (неизвестными) математическими ожиданиями полученных оценок координат, которые, будучи подставлены в системы уравнений (9), (10), превратили бы их в точные равенства, а матрица ковариаций оценок $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{\xi}_i, \tilde{\psi}_i)$ диагональна:

$$K_{xy} = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 \end{pmatrix}; \quad K_{\xi\psi} = \begin{pmatrix} \sigma_\xi^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\psi^2 \end{pmatrix}; \quad K_{xy, \xi\psi} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Приведенная выше формальная постановка задачи оценивания параметров аффинного преобразования показывает, во-первых, что она обладает полной симметрией в обеих своих формах (9) и (10), а во-вторых, достаточно получить ее общее решение только для одной из 4-х координат $\{x, y, \xi, \psi\}$ (принятой в качестве базовой), например, для ξ , основываясь на следующих формулировках:

$$\begin{cases} \xi_i = A_0 + A_1 x_i + A_2 y_i \\ \tilde{x}_i = x_i + \delta x_i \\ \tilde{y}_i = y_i + \delta y_i \\ \tilde{\xi}_i = \xi_i + \delta \xi_i \end{cases}, \quad i \in I, \quad (9a)$$

где $(\delta x_i, \delta y_i, \delta \xi_i) \sim N(0; K)$, $K = \text{diag}(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_\xi)$. Соответственно, в матричной форме имеем

$$\begin{cases} \Xi = (J|P) \cdot A & \text{(теоретическая связь входа/выхода)} \\ \tilde{P} = P + \delta P & \text{(сигнал на входе)} \\ \tilde{\Xi} = \Xi + \delta \Xi & \text{(сигнал на выходе)} \end{cases}, \quad (9b)$$

где $J = J_{n \times 1} = (1, 1, \dots, 1)^T$, $(J|P)$ – операция «блочного» объединения матриц J и P , а оцениванию подлежат не только целевые параметры $A = (A_0, A_1, A_2)^T$, но и целый ряд вспомогательных параметров. А именно, попутно необходимо найти неискаженные погрешностями входные/выходные сигналы: матрицу P со строками $P_i = (x_i, y_i)$, $i \in I$, и вектор $\Xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$ при условии, что $3n$ -вектор из столбцов матриц входных/выходных погрешностей δP и $\delta \Xi$ имеет нулевые средние и матрицу ковариаций, равную $\text{diag}(\sigma_x \cdot \square_n, \sigma_y \cdot \square_n, \sigma_\xi \cdot \square_n)$, где \square_n – единичная матрица $n \times n$.

Следует отметить, что в случае пренебрежимо малых входных погрешностей δP (т.е. при $\sigma_x = \sigma_y = 0$) вместо (9б) имеем стандартную задачу МНК. В том числе, если использовать введенную ранее в рассмотрение расширенную матрицу входных сигналов $U = U_{n \times 3} = (J|P)$, то МНК-оценки целевых параметров A могут быть записаны в виде [1, 11]

$$A_{\text{МНК}} = (U^T U)^{-1} U^T \tilde{\Xi}, \quad (13)$$

являясь несмещенными и обладая минимальными дисперсиями/ковариациями (в смысле соответствующих квадратичных форм). Выражаясь точнее, ковариационная матрица оценок (13) равна $D(A_{\text{МНК}}) = (U^T U)^{-1} \cdot \sigma_\xi^2$, где «единичная» дисперсия σ_ξ^2 может быть оценена по невязкам $E = \tilde{\Xi} - U \cdot A$ уравнений (9б).

Однако в общем случае (при $\delta P \neq 0$) МНК-оценки (13) не только теряют указанные свойства оптимальности, но могут даже оказаться несостоятельными [12–14]. Более того, в ряде конкретных ситуаций, даже если смещения МНК-оценок (13) оказались относительно небольшими, тем не менее, соответствующие оценки точности могут быть неадекватно завышены (на порядок и более) [6]. После осознания указанного дефекта МНК-оценок рядом специалистов первоначально были предложены приближенные алгоритмы, частично компенсирующие смещение этих оценок в указанной ситуации (см., напр., [15]). Однако для точного корректного решения задачи (9б) правильнее использовать конфлюэнтный подход [6, 16]. Для пояснения его сути в рассматриваемом случае связи между

двумерными величинами предварительно представим оценки (13) как соответствующие МНК-критерию следующего вида:

$$A_{МНК} = \arg \min (\tilde{\Xi} - UA)^T (\tilde{\Xi} - UA) = \arg \min \left(\frac{\tilde{\Xi} - UA}{\sigma_\xi} \right)^T \left(\frac{\tilde{\Xi} - UA}{\sigma_\xi} \right), \quad (14)$$

где $U = (\square \square X \square Y)$ – расширенная матрица входных сигналов, а минимум ищется при варьировании только параметров $A = (A_0, A_1, A_2)^T$. Из такой записи становится ясным, как расширить критерий (14) для случая ненулевых σ_x, σ_y (т.е. для конфлюентной постановки задачи):

$$A_{Конфл} = \arg \min \left[\left(\frac{\tilde{X} - X}{\sigma_x} \right)^T \left(\frac{\tilde{X} - X}{\sigma_x} \right) + \left(\frac{\tilde{Y} - Y}{\sigma_y} \right)^T \left(\frac{\tilde{Y} - Y}{\sigma_y} \right) + \left(\frac{\tilde{\Xi} - UA}{\sigma_\xi} \right)^T \left(\frac{\tilde{\Xi} - UA}{\sigma_\xi} \right) \right], \quad (15)$$

При матричной записи входного сигнала $\tilde{P} = (\tilde{X} : \tilde{Y})$ и $P = (X \square Y)$ критерий (15) можно переписать в виде:

$$A_{Конфл} = \arg \min \left[(\tilde{P} - P)^T K_{xy}^{-1} (\tilde{P} - P) + \left(\frac{\tilde{\Xi} - UA}{\sigma_\xi} \right)^T \left(\frac{\tilde{\Xi} - UA}{\sigma_\xi} \right) \right], \quad (15a)$$

где K_{xy} определено в (12), $U = (\square \square P)$, а минимум ищется при варьировании как A , так и P . Заметим, что эта форма конфлюентного критерия будет верна и для произвольной матрицы ковариаций K_{xy} оценок $(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)$ основных координат (предполагаемой известной).

Наконец, в наиболее общей записи при одновременном участии обеих альтернативных координат (ξ, ψ) , что полностью задает преобразование (9), окончательно имеем следующий критерий

$$(A:B)_{Конфл} = \arg \min \left[(\tilde{P} - P)^T K_{xy}^{-1} (\tilde{P} - P) + (\tilde{Q} - Q)^T K_{\xi\psi}^{-1} (\tilde{Q} - Q) \right], \quad (15b)$$

где $K_{xy}, K_{\xi\psi}$ определены в (12), $\tilde{P} = (\tilde{X} : \tilde{Y})$, $\tilde{Q} = (\tilde{\Xi} : \tilde{\Psi})$, $Q = U(A|B)$, $U = (J|P)$, а минимум ищется при варьировании как $A = (A_0, A_1, A_2)^T$, $B = (B_0, B_1, B_2)^T$, так и $P = (X|Y)$.

Аналогичным образом, для оптимального оценивания преобразования (10) имеем критерий, который, несмотря на внешнее сходство с (15b), тем не менее, содержит другие внутренние переменные:

$$(C:D)_{Конфл} = \arg \min \left[(\tilde{P} - P)^T K_{xy}^{-1} (\tilde{P} - P) + (\tilde{Q} - Q)^T K_{\xi\psi}^{-1} (\tilde{Q} - Q) \right], \quad (16)$$

где $K_{xy}, K_{\xi\psi}$ определены в (12), $\tilde{P} = (\tilde{X} : \tilde{Y})$, $\tilde{Q} = (\tilde{\Xi} : \tilde{\Psi})$, $P = V(C|D)$, $V = (J|Q)$, а минимум ищется при варьировании как $C = (C_0, C_1, C_2)^T$, $D = (D_0, D_1, D_2)^T$, так и $Q = (\Psi|\Xi)$. Заметим, что обе из полученных форм конфлюентного критерия будут верны и для произвольных известных матриц ковариаций K_{xy} и $K_{\xi\psi}$ оценок основных и альтернативных координат.

Таким образом, в соответствии с полученными критериями (15b), (16) могут быть найдены достоверные оценки целевых параметров, в том числе, с адекватным оцениванием их показателей точности. Однако детализация построения соответствующего алгоритма выходит за рамки данного доклада. Отметим лишь, что этот алгоритм носит итерационный характер, а за начальные приближения основных параметров $\{A, B, C, D\}$ целесообразно выбрать их МНК-оценки, аналогичные (13).

Выводы

Поскольку традиционный метод наименьших квадратов обеспечивает оптимальные оценки параметров функций только при строгом соблюдении регрессионной модели данных, на практике необходимо использовать и другие методы построения ГХ.

В докладе рассматриваются различные варианты конструктивного расширения регрессионных моделей с целью получения соответствующих конфлюентных оценок ГХ. Основными критериями расширения являются, с одной стороны, возможность получения необходимой информации в измерительных задачах, и с другой стороны – получение с учетом такой информации состоятельных оценок ГХ.

Рассмотрены вопросы оценивания погрешностей получаемых конфлюентных оценок ГХ с учетом как случайных, так и систематических погрешностей данных.

Обоснована целесообразность выполнять аттестацию конфлюентных алгоритмов в соответствии с полной схемой аттестации – как в асимптотических случаях (при больших объемах данных), так и при малых выборках данных.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00801).*

Литература

1. **Линник, Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1961.
2. **Айвазян, С. А., Енюков, И. С., Мешалкин, Л. Д.** Прикладная статистика: Исследование зависимостей. – М.: Финансы и статистика, 1985.
3. **Демиденко, Е. З.** Линейная и нелинейная регрессии – М.: Финансы и статистика, 1981.
4. **Мэйндроналд, Дж.** Вычислительные алгоритмы в прикладной статистике. – М.: Финансы и статистика, 1988.
5. **Mosteller, F., Tukey, J. W.** Data analysis and regression: a second course in statistics. – Addison-Wesley Publ., Reading, Massachusetts.
6. **Меченов, А. С.** О конфлюентном подходе в регрессионном анализе. – Методы математического моделирования. – М.: Изд. МГУ, 1994.
7. **Грановский, В. А., Сирая, Т. Н.** Методы обработки данных при измерениях – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
8. **Гарбеев, Ю. В., Челпанов, И. Б., Сирая, Т. Н.** Аттестация алгоритмов обработки данных при измерениях // Измерения, контроль, автоматизация. – 1991 – № 3.
9. **Chelpanov, I. B., Siraya, T. N.** Certification of data processing algorithms in measurements: Principles and results. – In: "Methodological aspects of data processing and information systems in metrology", ed. by D.Richter, V.A.Granovsky. – PTB-Bericht IT-7, 1999.
10. **T. Siraya,** Certification of algorithms for constructing calibration curves of measuring instruments, Advances in Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X (vol.10), Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, vol. 86, World Scientific, Singapore, 2015, pp 367-374.
11. **Крамер, Г.** Математические методы статистики. – М.: ИЛ. – 1948. – 631 с.
12. **Исаев, А. Б.** Основные принципы конфлюентного анализа и некоторые алгоритмы обработки линейных зависимостей // Измерительная техника, 1982, №10, с. 13- 16.
13. **Исаев, А. Б.** О применимости метода максимального правдоподобия в конфлюентном анализе // Метрология, 1984, №12, с. 16-26.
14. **Федоров, В. В.** Теория оптимального эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 312 с.
15. **Hodges, S. D., Moore, P. G.** Data Uncertainties and L.S. Regression // Applied Statistics, v. 21, №2, 1972, p.p. 185-195.
16. **Грешилов, А. А., Стакун, В. А., Стакун, А. А.** Статистические методы принятия решений с элементами конфлюентного анализа. – М.: Радио и связь, 1998. – 112 с.

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНО ВОЗМОЖНЫХ ТОЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ МЕЖДУ ОСЯМИ УЗКОНАПРАВЛЕННЫХ ЛУЧЕЙ И ОБОСНОВАНИЕ СООТВЕТСТВУЮЩЕГО КООРДИНАТНОГО МЕТОДА

К. С. Гороховский¹, М. Д. Кудрявцев²,

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ, (812) 499-83-37, e-mail: elprib@online.ru

Аннотация

Ключевые слова: оптический луч с малой угловой апертурой, регистратор лучей, эффективная ось луча, угол между лучами, координатный метод измерений углов.

Продолжен цикл работ, посвященных теоретическому обоснованию и разработке методов и средств угловых измерений, основанных на использовании источников оптических лучей с малой угловой апертурой. В качестве такого источника выбрана голографическая призма, представляющая собой кристалл флюорита с записанной в его объеме системой наложенных голограмм и генерирующая при ее освещении референтным лазером ряд дифрагированных лучей в виде плоского веера, обладающего высокой пространственной стабильностью, включая постоянство углов между любой парой лучей веера в достаточно широких диапазонах внешних условий. На основе введенного ранее понятия эффективной оси луча рассмотрены потенциально возможные точные методы измерений углов между лучами веера, обоснован и реализован координатный метод с использованием координатной измерительной машины. Выполнен анализ точности предложенного метода измерений углов и показана достижимость погрешностями его результатов уровня 1" и менее.

Введение

Данный доклад продолжает цикл работ [1–6], посвященных теоретическому обоснованию и разработке методов и средств угловых измерений, основанных на использовании источников оптических лучей с малой угловой апертурой, аналогичных лазерным указателям и прицелам, в предположении, что указанные методы и средства планируется применять в «лабораторных» масштабах с длиной элементов измерительной оснастки порядка единиц метров и менее. При этом в качестве такого многолучевого источника был использован новый оптический элемент в виде так называемой *голографической призмы* (ГП) [1–4], представляющей собой компактный монокристалл флюорита ($\sim 1 \text{ см}^3$) с записанной в его объеме системой наложенных голограмм, при освещении которого референтным лазером указанная система генерирует *плоский веер* узконаправленных дифрагированных лучей (по одному на каждую голограмму). Выполненный теоретический анализ свойств физической среды-носителя голограмм и условий порождения данного веера лучей дает достаточно веские основания ожидать его *высокой пространственной стабильности*, в том числе и строгого постоянства углов между любой парой лучей веера в достаточно широких диапазонах внешних условий (климатических, механических, электромагнитных и др.). Таким образом, ГП потенциально может служить новым типом *многозначной меры плоского угла*, одновременно обладающей миниатюрностью и высокой стабильностью. Соответственно, естественным образом возникает задача аттестации этой меры, включая точные измерения указанных углов между лучами.

При анализе данной задачи и попытке сформулировать соответствующие измерительные модели было установлено, что имеют место значительные пробелы в четкости понимания, что же считать углом между двумя лучами. При этом применяемая до недавнего времени трактовка таких углов на интуитивно-вербальном уровне строгости оказалась явно недостаточной. В результате в [7] были сформулированы принципы формирования углов между плоскостями и между прямыми, в том числе, были выявлены существенные различия этих принципов при построении измерительных моделей на основе плоских зеркал (моделируемых плоскостями) и на основе узконаправленных лучей (моделируемых прямыми), несмотря на наличие их полной математической эквивалентности. Эти построения позволили ввести математически строгие базовые понятия *интегральной нормали* плоского зеркала и *эффективной оси* узконаправленного луча, без которых, как выяснилось, невозможна формализация рассматриваемых угловых измерительных моделей на должном уровне строгости, что, в свою очередь, существенно ограничивало точность, потенциально достижимую при разработке указанных методов и средств.

Дополнительно следует обратить внимание, что при использовании для угловых измерений любых оптических методов их необходимым элементом является *регистратор* того или иного вида. Так, для традиционных измерений угла между двумя зеркалами (или между двумя последовательными

¹ Инженер 2-й категории.

² Кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

пространственными положениями одного зеркала) необходим автоколлиматор, теодолит, тахеометр и им подобные приборы. При этом их отличительной особенностью является способность *непосредственно* наблюдать за *подвижным зеркалом*, плавно меняющим свою угловую ориентацию, что приводит к соответствующему движению в поле зрения прибора отраженного от зеркала изображения марки. По всей видимости, именно этот факт до настоящего времени снимал всю остроту отсутствия в литературе четкого и математически строгого понимания, что же такое угол между двумя плоскими зеркалами (при попытке его точно измерить с корректным оцениванием всех составляющих погрешности, включая и методическую).

В то же время, пока что не созданы аналогичные устройства, позволяющие напрямую следить за *подвижным лучом*. В этой ситуации наиболее целесообразен, как показано в [7], косвенный способ фиксации текущего положения подвижного (вместе с источником) луча путем регистрации нескольких (не менее двух) его *поперечных сечений* в некоторой достаточно протяженной системе координат, охватывающей все «рабочее пространство». Указанная система координат может быть двух- или трехмерной, а для ее формирования можно использовать, например, *координатную измерительную машину*, имеющую рабочую зону порядка $500 \times 500 \times 500$ (мм), внутри которой возможно позиционирование с погрешностью 1 мкм и менее. В качестве *регистратора лучей* могут быть выбраны одномерные/двумерные многоэлементные структуры (например, ПЗС-линейки или ПЗС-матрицы), расположенные *неподвижно на некотором удалении* от подвижного источника лучей и изначально ориентированные таким образом, чтобы в моменты последовательной регистрации каждого из лучей (т.е. при пересечении подвижным лучом рабочей зоны регистратора) находиться приблизительно в поперечной лучу плоскости. При этом допустимы весьма значительные отклонения от перпендикулярности этих лучей от сопоставляемой регистратору прямой (для ПЗС-линейки) или плоскости (для ПЗС-матрицы), которые могут достигать десятков градусов (подробнее см. ниже).

Укажем также, что при выборе в качестве опорных элементов прямых (а не плоскостей, как в традиционных угловых измерениях с помощью плоских зеркал и их систем) с целью формирования углов в измерительных моделях высокие точности порядка единиц и долей угловых секунд, как правило, достигаются *за счет больших баз*, образованных, например, элементами земной поверхности [8] или объектами ближнего/дальнего космоса [9]. Ниже сделана попытка построения родственных методов *в лабораторных масштабах*. При этом отказ от использования больших баз стал возможен: 1) благодаря созданию и применению нового оптического элемента – ГП, стабильность которого как многозначной меры плоского угла нового типа обеспечена высокотехнологичными периодическими наноструктурами в его носителе-монокристалле; 2) путем регистрации сечений лучей равномерными многоэлементными ПЗС-структурами; 3) за счет высокоточного позиционирования всех компонентов с помощью КИМ.

Базовые определения и формальная постановка измерительной задачи

Пусть имеется множественный *источник лучей* (ИЛ), генерирующий одновременно m узконаправленных оптических лучей ($m \geq 2$) малого сечения, каждый из которых аналогичен лучу лазерного указателя или прицела и имеет диаметр порядка $d = 1$ мм. Предполагается, что конструкция рассматриваемого ИЛ обладает достаточной жесткостью и пространственной стабильностью, обеспечивающей постоянство углов между любой парой лучей ИЛ при варьировании различных внешних условий в установленных пределах, в том числе, и при различных перемещениях ИЛ. При этом, до введения строгого определения понятия угла между лучами, указанная пространственная стабильность может пониматься как неизменность относительного расположения следов лучей на некотором экране, значительно удаленном от ИЛ.

Кроме того, поскольку ИЛ предполагается подвижным, то для упрощения формулирования соответствующих «угловых» измерительных моделей целесообразно наложить следующие три ограничения:

1) все лучи ИЛ лежат *в одной плоскости*, называемой ниже *плоскостью лучей* (ПЛ), что аналогично рассмотренной выше ГП, однако без специального требования к лучам образовывать *в точности расходящийся веер* (т.е. исходить из некоторой *общей для всех лучей точки* – центра веера); при этом вполне очевидно, что, любой многолучевой ИЛ с «плоской» конфигурацией можно читать *приблизительно* веерным (по крайней мере, на удалениях, много больших габаритных размеров ИЛ), в том числе и при наличии «дублирующих» (в «угловом» смысле) друг друга лучей, являющихся взаимно параллельными, однонаправленными, но один из них сдвинут в поперечном направлении;

2) множество лучей ИЛ в совокупности обладает свойством четко выраженной преимущественной «направленности», в том смысле, что два луча с крайней ориентацией («самый левый» и «самый правый»

при взгляде на ПЛ сбоку) образуют угол, меньший 90° ¹; при этом будем считать, что *биссектриса* этого угла задает некоторое *среднее направление* ИЛ, а его вершина – центр ИЛ; кроме того, выделение «крайних» лучей позволяет ввести естественную нумерацию всех лучей ИЛ (одним из двух равнозначных способов), которую будем использовать далее;

3) рассматриваются только такие движения ИЛ, в процессе которых указанная ПЛ совмещается сама с собой; из теоретической механики следует, что это либо сдвиг вдоль прямолинейной направляющей, параллельной ПЛ, либо чистое вращение вокруг оси, перпендикулярной ПЛ, либо их комбинация.

Для конкретизации использованных выше понятий «плоскость лучей», «центр ИЛ», «направление луча» и «среднее направление ИЛ» сопоставим каждому лучу *эффективную оптическую ось*, понимаемую в соответствии с [7] как результат *двухступенчатого пространственного усреднения* интенсивности его излучения $I = I(x, y, z)$ в некоторой фиксированной декартовой системе координат, где через Z обозначена та из трех осей координат, которая образует с рассматриваемым лучом *наименьший* угол (на грубом визуальном уровне точности). Указанное усреднение выполняем сначала в нескольких *поперечных сечениях* луча $S = S(z)$ (которые параллельны плоскости ХУ) путем вычисления «*центров тяжести*»:

$$x_c(z) = \frac{1}{I_0(z)} \iint_{S(z)} x I(x, y, z) dx dy; \quad y_c(z) = \frac{1}{I_0(z)} \iint_{S(z)} y I(x, y, z) dx dy, \quad (1)$$

где $I_0(z) = \iint_{S(z)} I(x, y, z) dx dy$ – интенсивность излучения в поперечном сечении $S(z)$ в целом; $z = z_i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) – «продольные» координаты анализируемых сечений ($N \geq 2$), а к сечениям не предъявляется требование быть перпендикулярными к оси луча (понимаемой пока что интуитивно). Хотя при таком выборе поперечных сечений луча они могут быть сильно вытянутыми и иметь эллиптическую форму (вместо круговой), однако нетрудно видеть, что центр сечения инвариантен к его форме и, соответственно, к углу наклона луча к оси Z , который может достигать значений вплоть до $\arccos(1/\sqrt{3}) \approx 55^\circ$.

При этом для *реального* луча полученные центры сечений $\{(x_c(z_i), y_c(z_i), z_i)\} = \{(x_i, y_i, z_i)\}$ могут и не лежать *строго на одной прямой* (при $N \geq 3$) в силу погрешностей измерений интенсивности I , неточности позиционирования соответствующего регистратора, а также неоднородности среды распространения излучения. Поэтому следует выполнить *прямолинейную аппроксимацию* найденных центров (1), причем в качестве критерия целесообразно выбрать следующий *ортогональный квадратичный критерий*:

$$\sum_i d_i^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где d_i – наикратчайшее расстояние от центра i -го сечения (x_i, y_i, z_i) до искомой прямой [10]:

$$d_i^2 = \left| \begin{array}{cc} a_y & a_z \\ y_i - y_0 & z_i - z_0 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} a_z & a_x \\ z_i - z_0 & x_i - x_0 \end{array} \right|^2 + \left| \begin{array}{cc} a_x & a_y \\ x_i - x_0 & y_i - y_0 \end{array} \right|^2, \quad (3)$$

$(a_x, a_y, a_z)^T, (x_0, y_0, z_0)$ – искомые единичный *направляющий вектор* и *опорная точка* прямой. При этом критерий (2)–(3) следует дополнить нормирующим условием $a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = 1$.

Решая данную задачу на *условный экстремум* стандартным способом через множитель Лагранжа, получаем следующее определение эффективной оси луча:

$$\left\{ \begin{array}{l} (x_0, y_0, z_0) = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) - \text{«центр тяжести» исходного набора точек } \{(x_i, y_i, z_i)\}; \\ (a_x, a_y, a_z)^T - \text{собственный вектор для наименьшего собственного числа матрицы } A \text{ вида} \\ A = \begin{pmatrix} S_{yy} + S_{zz} & -S_{xy} & -S_{xz} \\ -S_{xy} & S_{xx} + S_{zz} & -S_{yz} \\ -S_{xz} & -S_{yz} & S_{xx} + S_{yy} \end{pmatrix}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $\bar{x} = (\sum x_i)/N$; $S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2$; $S_{xy} = \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ и т.п. Соответственно, угол между двумя *физическими реальными лучами* определим как *ориентированный угол между их эффективными осями*

¹ Это означает, что здесь не рассматриваются ИЛ панорамного типа, имеющие круговой «обзор». Однако при необходимости измерения углов такого ИЛ его можно искусственно разбить на два или более «направленных» ИЛ.

(4), учитывая тот факт, что каждый из лучей естественно ориентирован по направлению его распространения.

Отметим, что полученные выражения (4) для вычисления эффективной оси реального оптического луча имеет интуитивно понятный физический смысл – это та из главных осей *тензора инерции* [11] некоторой массы, равномерно распределенной по N точкам $\{(x_i, y_i, z_i)\}$, относительно которой *минимален* ее момент инерции. Из этого следует *инвариантность* так определенной эффективной оси луча к выбору системы координат XYZ. Кроме того, из формул (1)–(4) можно вывести, что *угловая стабильность* задаваемого реальным лучом пространственного направления $(a_x, a_y, a_z)^T$ тем выше, чем больше *протяженность* $L = \sqrt{(x_N - x_1)^2 + (y_N - y_1)^2 + (z_N - z_1)^2}$ луча между крайними из проанализированных сечений $S(z_1), S(z_N)$ и чем меньше *средний разброс* $\sigma = \sqrt{(\sum d_i^2)/N}$ центров (1) в различных сечениях. Так, для реально достижимого на сегодня значения $\sigma = 0,001$ мм и при $L \sim 1000$ мм уровень угловой стабильности так определенной оси луча составляет 1" и лучше. При этом, как показало моделирование, можно ограничиться числом сечений $N=2$ в простых случаях, а при повышенных требованиях к точности – значениями $3 \leq N \leq 10$, т.к. при дальнейшем увеличении N угловая стабильность луча практически не улучшается.

Что касается формальных математически строгих определений использованных выше понятий «плоскость лучей» и «центр ИЛ», то для реальных ИЛ, имеющих малые искажения геометрии, будем понимать их следующим образом: а) за центр ИЛ примем точку, наименее удаленную на равные расстояние от осей «крайних» лучей ИЛ (которые вместо пересечения могут и скрещиваться); б) плоскость лучей определим как проходящую через определенный выше центр ИЛ и характеризуемую минимальными в среднеквадратическом смысле угловыми отклонениями осей всех лучей ИЛ от этой плоскости.

Выбор конструкции регистратора, построение его модели и калибровка

Далее, с учетом дополнительного требования к ИЛ иметь «плоскую» конфигурацию, в качестве *регистратора лучей* (РЛ) достаточно выбрать ПЗС-линейку, естественной моделью которой является прямая линия, называемая далее *осью регистрации* (ОР). Указанная ось формируется центрами пиксельных ячеек, образующими рабочую зону ПЗС-линейки, и может быть формально определена на основе их аппроксимации прямой линией по *методу наименьших квадратов* (МНК), поскольку технология производства ПЗС-линеек обеспечивает как хорошую прямолинейность расположения ячеек, так и их следование с постоянным шагом, что, по сути, задает высококачественную линейную шкалу. Единственным недостатком такого РЛ (для использования в обозначенных выше целях) является ограниченная протяженность рабочей зоны выпускаемых в настоящее время ПЗС-линеек (порядка 20–50 мм при числе пикселей 10^3 – 10^4). Однако это легко преодолеть путем использования сборки из двух и более ПЗС-линеек, выставленных соответствующим образом вдоль общей ОР и укрепленных на едином жестком основании, что и предполагается далее. При этом, несмотря на выпуск ПЗС-линеек с субмикронным шагом ячеек (которые, соответственно, весьма дороги), для целей регистрации лучей могут быть использованы и бюджетные приборы с относительно большим шагом ячеек порядка 10–20 мкм. Это обусловлено вычислением «центров тяжести» сечений по (1), что эквивалентно значительному уменьшению шага, пропорционально квадратному корню из числа усредняемых ячеек в сечении луча.

Взаимодействие одного из лучей ИЛ и выбранного РЛ описывает рис. 1, на котором отсчеты по ОР обозначены через w . Здесь учтены две важных особенности. Во-первых, луч может падать на ОР под углом, отличным от 90° , что приведет к растяжению «продольного» диаметра d' по сравнению с «поперечным» диаметром d (равным действительному диаметру луча). Во вторых, центр пятна (центр двумерного сечения луча) может иметь некоторое боковое смещение от ОР, что приведет к попаданию на ряд пиксельных ячеек не центрального диаметра пятна, а параллельной ему хорды. Однако нетрудно видеть, что центр тяжести $w = w_0$, вычисляемый в соответствии с (1), инвариантен к обоим указанным факторам в предположении симметричности распределения интенсивности излучения I в пределах пятна и относительной малости бокового смещения (например, не более $d/2$).

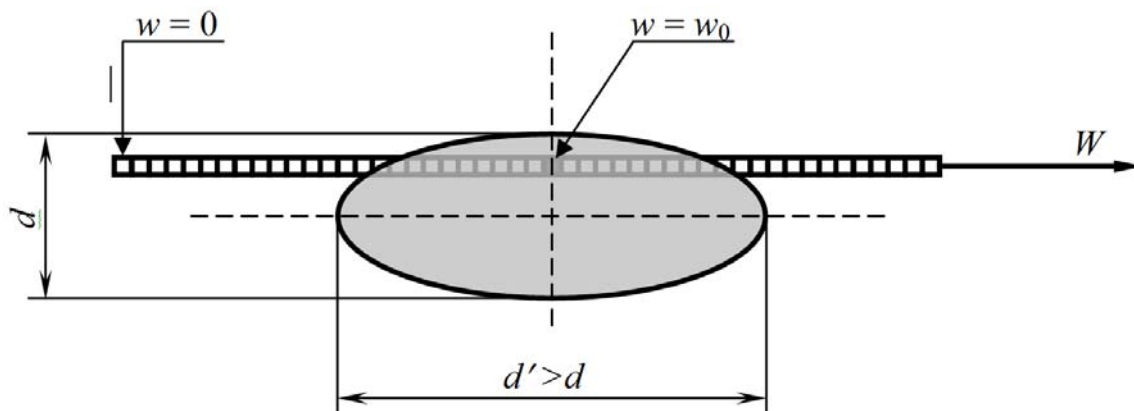


Рисунок 1 – Схема взаимодействия одного из лучей ИЛ и РЛ в виде ПЗС-линейки

Важным является вопрос калибровки линейной шкалы, формируемой РЛ. Такая калибровка может быть выполнена на КИМ и состоит из двух частей: 1) калибровка шага следования ячеек, мм/пикс. (включая оценку их неравномерности); 2) калибровка линейного сдвига каждой дополнительной ПЗС-линейки в сборке относительно основной (начальной) линейки с привязкой к пикселу №1 каждой линейки; 3) выравнивание ОР каждой линейки таким образом, чтобы они вместе образовывали общую ОР с отклонениями в пределах $d/10$ (предварительное ориентировочное значение).

Для упрощения конструкции был выбран «составной» регистратор всего из двух линеек, имеющих по 2032 ячейки с шагом 14 мкм, но разнесенных на расстояние между центрами их зон регистрации на 500 мм. В состав РЛ входили также мультиплексор и контроллер, обеспечивающие съем сырых данных (поячеечных) с ПЗС-линеек с частотой 1 кГц и передачу их в компьютер. Для калибровки была использована КИМ модели UPMC 550 Carat (производитель Carl Zeiss, GmbH, Германия), имеющая размеры рабочей зоны 450×500×550 (мм) и погрешность позиционирования менее 1 мкм.

Для проведения указанной калибровки на измерительной головке КИМ (ИГ) был закреплен лазерный источник с диаметром луча 1 мм, направленный вертикально вниз. На столе КИМ был установлен вдоль одной из ее координатных осей указанный РЛ. При подконтрольных перемещениях ИГ с шагом 2 мм (и кратковременной программируемой остановкой) в пределах зон регистрации каждой из двух линеек происходил съем сырых данных с вычислением центров тяжести в соответствии с (1). Результаты аналогичной калибровки для сборки из 7 линеек показаны на рис. 2. После получения градуировочной зависимости указанного вида (с явной периодической составляющей на каждой линейке) была выполнена привязка логических номеров пикселей каждой из двух линеек к двухмиллиметровым отметкам абсолютной шкалы КИМ, которые соответствуют ее остановкам. Апостериорная оценка точности указанной привязки составила 0,8 мкм (после соответствующей МНК-подгонки полученной зависимости), что характеризует также и оценку неравномерности следования пиксельных ячеек каждой из ПЗС-линеек.



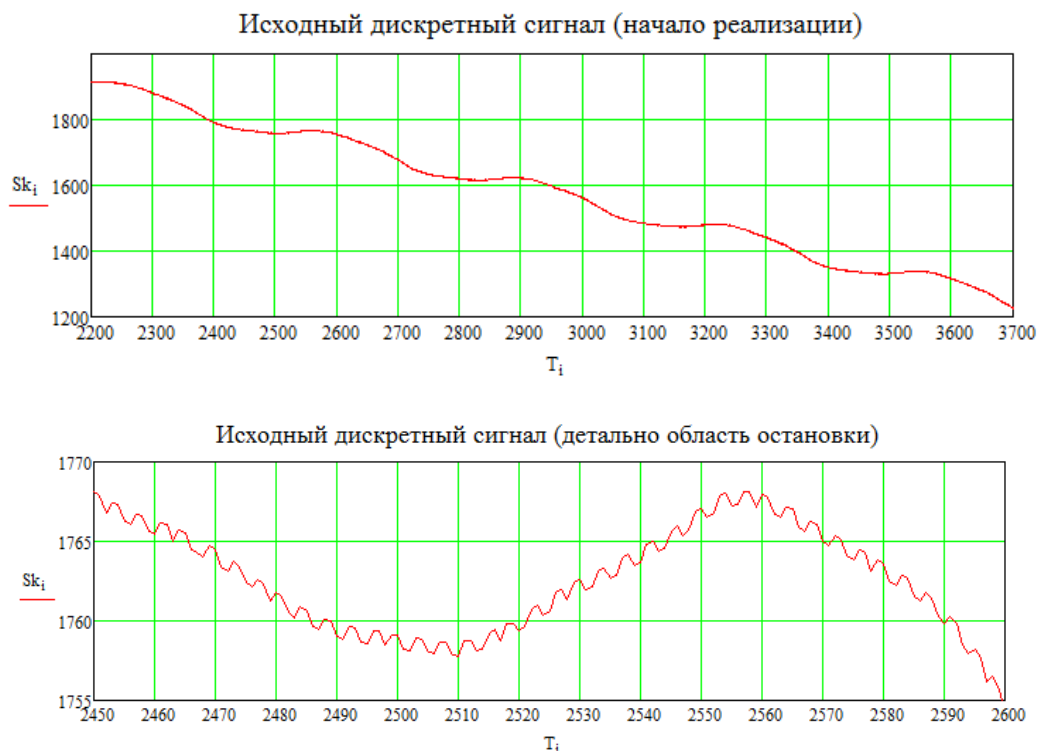


Рисунок 2 - Обработка сырых данных при калибровке сборки ПЗС-линеек на КИМ (7 линеек, шаг 2 мм)

Таким образом, удалось перенести высокоточную линейную шкалу КИМ на шкалу «составного» регистратора, которая задана двумя согласованными между собой фрагментами, соответствующими рабочим зонам двух ПЗС-линеек (со значительным пропуском между ними порядка 470 мм). Однако, как показано ниже, это не является помехой для реализации основной измерительной процедуры.

Решение формальной задачи

Перейдем к описанию основной измерительной процедуры (методики калибровки), имеющей целью измерение угла между любой парой лучей ИЛ.

1. Пусть вдоль некоторой прямолинейной направляющей, закрепленной на столе КИМ, осуществляется пошаговое смещение плоского приблизительно веерообразного источника из t лучей (ИЛ) в направлении распространения лучей, веер которых имеет угол раскрытия не более 90° (между крайними лучами). Считаем, что в идеале плоскость указанного веера при движении не испытывает поперечных перемещений (т.е. каждый раз совмещается сама с собой), а также отсутствуют повороты лучей в этой плоскости и сдвиги центра веера поперек направляющей. Данной направляющей сопоставим ось OR с положительным направлением в сторону движения ИЛ и обозначим через r текущий сдвиг ИЛ вдоль направляющей (от некоторого начального положения). Для определенности дальнейшего изложения считаем, что ось OR – горизонтальна, а плоскость веера лучей – вертикальна (и проходит через ось OR). При этом все лучи веера направлены вперед (в сторону пошагового движения ИЛ) и занумерованы снизу вверх. Вертикальную ось, перпендикулярную оси OR и направленную вверх, обозначим через OZ , а отсчеты высот вдоль этой оси – через z . Сдвиг ИЛ вдоль направляющей r и его высоту z контролируем с погрешностью ± 1 мкм с помощью координатной измерительной машины (КИМ), на столе которой закреплена направляющая. Заметим, что возможен также вариант методики калибровки, при котором плоскость веера и ось OZ горизонтальны.

2. На пути распространения лучей (в плоскости их веера) располагаем прямолинейный ПЗС-регистратор лучей (РЛ) достаточной протяженности, обеспечив его неподвижность относительно указанной направляющей. Сопоставим данному РЛ ось ПЗС-отсчетов OW (пересчитанных из пикселей в миллиметры) с положительным направлением вверх и обозначим через φ угол, смежный с углом между осями OR и OW . Допускаются значительные отклонения данного угла от 90° в обе стороны ($30^\circ < \varphi < 120^\circ$), однако для осуществления калибровки углов между лучами веера рассматриваемым

способом угол φ должен быть известен (т.е. заранее измерен с желаемыми пределами погрешности $\pm 1''$). Все углы отсчитываются, как обычно, против часовой стрелки при взгляде на плоскость ROW (плоскость веера) таким образом, чтобы оси OR и OW образовывали правую косоугольную систему координат. Оси OW и OZ направлены в одну полуплоскость относительно оси OR в плоскости веера.

3. Лучу веера с номером i ($i = 1, 2, \dots, m$) сопоставим угол θ_i между осью OR и этим лучом при начальном положении ИЛ (перед первым смещением вдоль направляющей). Из сделанных выше допущений следует, что: а) $\theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_m$, б) $|\theta_i| < 90^\circ$, в) $\theta_m - \theta_1 < 90^\circ$ (и эти параметры являются целевыми для проводимой калибровки). Кроме того, для осуществимости рассматриваемой калибровки следует потребовать: $30^\circ < \varphi + \theta_1 < \varphi + \theta_m < 150^\circ$. Пояснения приведены на рис. 3.

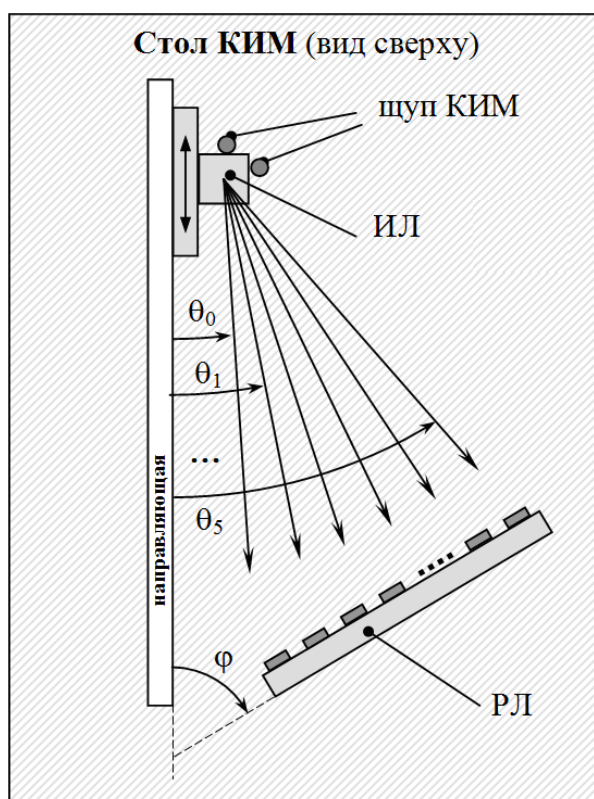


Рисунок 3 - Метод измерений углов ИЛ с помощью КИМ и РЛ (горизонтальный вариант ПЛ)

4. Для луча с номером i основная зависимость его текущего ПЗС-отсчета w_i от линейного сдвига r строго линейна во всём диапазоне изменений переменных w_i, r :

$$w_i = a_i \cdot r + b_i, \quad (5)$$

где a_i – коэффициент, жестко связанный с углами φ и θ_i ; b_i – константа, учитывающая некоторый произвол при выборе начал отсчета по осям OR и OW (подлежат оцениванию).

5. Для коэффициента a_i справедливо точное выражение:

$$a_i = \frac{\sin \theta_i}{\sin(\varphi + \theta_i)}. \quad (6)$$

6. Для исключения неизвестной константы b_i с целью оценивания a_i (а через него – искомого угла θ_i) в простейшем случае можно перейти к приращениям $\Delta w_i = w_i^{(2)} - w_i^{(1)}$ и $\Delta r = r^{(2)} - r^{(1)}$ для двух произвольных положений ИЛ:

$$\Delta w_i = a_i \cdot \Delta r, \quad (7)$$

откуда получается следующая оценка угла θ_i (это точное решение уравнения (6)):

$$\theta_i = \arctg \frac{\sin \varphi}{1/a_i - \cos \varphi} = \arctg \frac{\Delta w_i \cdot \sin \varphi}{\Delta r - \Delta w_i \cdot \cos \varphi}. \quad (8)$$

7. Предел погрешности упрощенной оценки (8) можно оценить только априорно (через функции влияния), что, однако, значительно завышает его (дает оценку сверху).

8. Оценки искомых углов $\{\theta_i\}$ с адекватными оценками погрешности можно получить лишь на основе избыточных данных, применяя *метод наименьших квадратов* (МНК) к уравнениям связи (5) и

выполняя апостериорное оценивание погрешности (согласно общей схеме МНК), с дальнейшим пересчетом к углам $\{\theta_i\}$ согласно (8). При этом для надежного оценивания каждый луч должен быть зарегистрирован не менее 5 раз (желательно – не менее 10 раз) при различных положениях ИЛ, сдвигаемого вдоль направляющей.

9. С целью повышения точности результатов при применении МНК необходимо дополнительно учесть в модельных уравнениях (5) следующие основные факторы: а) неидеальность движения ИЛ (его малые поперечные сдвиги от оси ОР и малые повороты в плоскости веера); б) неидеальность формы РЛ (малые отклонения от прямолинейности); в) различие преломления разных лучей на защитном стекле РЛ. Соответствующие поправки следует прибавить к каждому ПЗС-отсчету w_i . Однако изложение этих вопросов выходит за рамки данного доклада.

10. Основным недостатком изложенной выше методики калибровки является необходимость предварительного измерения угла φ с достаточно высокой точностью. Это препятствие можно обойти следующим образом. А именно, помимо измерений при первом положении РЛ на столе КИМ (на этот раз – с неизвестным углом $\varphi_1 = \varphi$), повторим всю описанную процедуру калибровки, но для РЛ, повернутого на известный угол $\Delta\varphi$. Таким образом, во второй части калибровки угол наклона РЛ составит $\varphi_2 = \varphi + \Delta\varphi$. Очевидно, что приращение угла наклона РЛ $\Delta\varphi$ достаточно легко точно измерить, например, закрепив на РЛ многогранную призму с аттестованными углами и используя автоколлиматор. Это позволяет записать следующую систему уравнений, аналогичных (6):

$$a_i^{(1)} = \frac{\sin \theta_i}{\sin(\varphi + \theta_i)}; \quad a_i^{(2)} = \frac{\sin \theta_i}{\sin(\varphi + \Delta\varphi + \theta_i)}. \quad (9)$$

Несмотря на существенную нелинейность, эта система однозначно разрешима. Однако ввиду громоздкости этого решения последовательность его получения представлена на рис. 4, 5 с использованием символического процессора Mathcad.

Графическое решение системы двух и более уравнений (подтверждение единственности)

$$\theta_0 := 40 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{– угол наклона калибруемого луча ГП к направляющей (основной целевой параметр)}$$

$$\varphi_0 := 30 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{– угол наклона РЛ к направляющей в 1-м положении РЛ (доп. целевой параметр)}$$

$$\Delta\varphi_2 := -20 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{– изменение угла наклона РЛ к направляющей во 2-м положении РЛ (известен)}$$

$$\Delta\varphi_3 := 60 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \text{– изменение угла наклона РЛ к направляющей во 3-м положении РЛ (известен)}$$

$$a := \frac{\sin(\theta_0)}{\sin(\varphi_0 + \theta_0)} \quad \text{– оценивается на КИМ по линейной связи } w = w_0 - a \cdot r \text{ между отсчетами } w \text{ по РЛ и сдвигами } r, \text{ контролируемые по КИМ (для 1-го начального положения РЛ)}$$

$$\theta(\varphi) := \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\varphi)}{a^{-1} - \cos(\varphi)}\right) \quad \text{– угол } \theta \text{ как функция } \varphi \text{ в 1-м положении РЛ (при известном } a)$$

$$a_2 := \frac{\sin(\theta_0)}{\sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_2 + \theta_0)} \quad \text{– оценивается экспериментально на КИМ (для 2-го положения РЛ)}$$

$$\theta_2(\varphi) := \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\varphi + \Delta\varphi_2)}{a_2^{-1} - \cos(\varphi + \Delta\varphi_2)}\right) \quad \text{– угол } \theta = \theta(\varphi) \text{ во 2-м положении РЛ (при известных } a_2, \Delta\varphi_2)$$

$$a_3 := \frac{\sin(\theta_0)}{\sin(\varphi_0 + \Delta\varphi_3 + \theta_0)} \quad \text{– оценивается экспериментально на КИМ (для 3-го положения РЛ)}$$

$$\theta_3(\varphi) := \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\varphi + \Delta\varphi_3)}{a_3^{-1} - \cos(\varphi + \Delta\varphi_3)}\right) \quad \text{– угол } \theta = \theta(\varphi) \text{ в 3-м положении РЛ (при известных } a_3, \Delta\varphi_3)$$

Рисунок 4 - Последовательность получения решения системы (7) с использованием Mathcad

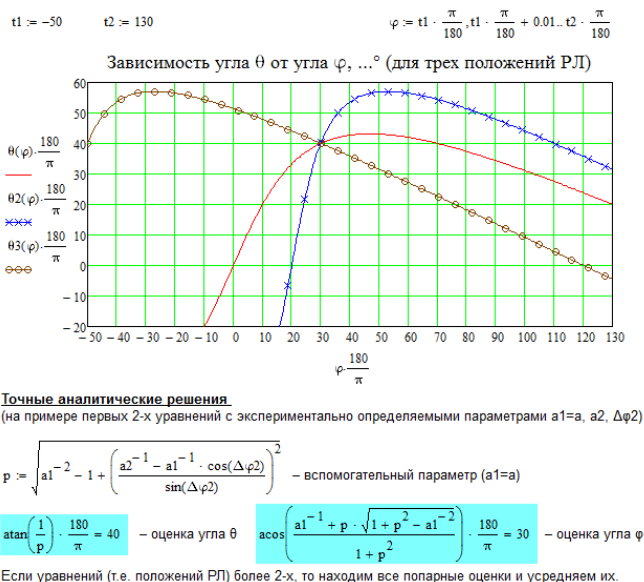


Рисунок 5 - Графическая иллюстрация единственности решения системы (9) с использованием Mathcad

Заключение

Таким образом, показана реализуемость предложенной методики калибровки любого ИЛ в лабораторных масштабах на уровне точности, соответствующей погрешности 1" и менее.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00082).*

Литература

1. Грановский, В. А., Кудрявцев, М. Д., Рыскин, А. И., Щеулин, А. С. // Патент РФ "RU 2332638 C1", приоритет от 14.10.2006, опубликовано: 27.08.2008, бюл. №24.
2. Грановский, В. А., Кудрявцев, М. Д., Рыскин, А. И., Щеулин, А. С. Новый оптический элемент – "голографическая призма". I. Принцип действия и экспериментальная реализация. – Оптика и спектроскопия, 2009, том 106, № 5, с. 855-863.
3. Ангервакс, А. Е., Грановский, В. А., Кудрявцев, М. Д., Рыскин, А. И., Щеулин, А. С. Новый оптический элемент – "голографическая призма". II. Метод измерений воспроизводимых углов. – Оптика и спектроскопия, 2010, том 108, № 5, с. 871-877.
4. Ангервакс, А. Е., Грановский, В. А., Кудрявцев, М. Д., Рыскин, А. И., Щеулин, А. С. Новый оптический элемент – "голографическая призма". III. Экспериментальная реализация голографической призмы модификации II. Сравнительная характеристика двух модификаций голографической призмы с точки зрения ее применений. – Оптика и спектроскопия, 2012, том 112, № 2, с. 343-348.
5. Avanesov, Yu. L., Gorokhovskiy, K. S., Granovskii, V. A., Kudryavtsev, M. D., Kulachenkov, N. K., Angervaks, A. E., Ryskin, A. I., Scheulin, A. S. Rotation Angle Measurement Device: Principle of Operation and Initial Calibration Results // 11th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, Castelldefels – Barcelona, 2014. – DOI: 10.1109/SSD.2014.6808783.
6. Аванесов, Ю. Л., Гороховский, К. С., Грановский, В. А., Кудрявцев, М. Д., Кулаченков, Н. К. Модель многолучевого верного источника в задаче контроля углового положения качающейся платформы. – Сб. тез. докл. 5-й Всеросс. научно-техн. конф. «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» СУДОМЕТРИКА-2014, СПб, 2014, с. 41–45.
7. Кудрявцев, М. Д. Сравнение принципов формирования углов между плоскостями и между прямыми. – Сб. тез. докл. 5-й Всеросс. научно-техн. конф. «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» СУДОМЕТРИКА-2014, СПб, 2014, с. 138–142.
8. Куштин, И. Ф., Куштин, В. И. Инженерная геодезия. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. – 416 с.
9. Брумберг, В. А., Глебова, Н. И., Лукашова, М. В. и др. Эфемеридная астрономия, Тр. ИПА РАН., вып. 10, 2004 г. – 488 с.
10. Корн, Г., Корн, Т. Справочник по математике для научных сотрудников и инженеров. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
11. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10 т. Т.I. Механика. – 5-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 224 с.

ВОПРОСЫ АДЕКВАТНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И НАВИГАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Т. Н. Сирая¹

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ,
(812) 499-83-37, e-mail: elprib@online.ru

Аннотация

Ключевые слова: систематическая погрешность, случайная погрешность, модель, адекватность

Рассматриваются вопросы обоснования и формализации основных практических приемов работы с систематическими погрешностями. Отмечены различные уровни измерительных моделей, необходимых для работы с систематическими погрешностями разного вида, в том числе, детерминированных и стохастических.

Рассмотрены возможности использования методов проверки адекватности измерительных моделей для решения различных задач выявления, анализа и снижения систематических погрешностей.

Введение

Проблемы, связанные с выявлением, устранением (или снижением), оценением и прогнозированием систематических погрешностей (СП) постоянно остаются в центре внимания метрологов [1–4].

По мнению М. Ф. Маликова, искусство метролога определяется умением работать именно с систематическими погрешностями [1].

Такого же мнения придерживаются многие современные метрологи. Например, по словам М. Сох [3]: «Систематические погрешности часто оказывают большее влияние на измерение, чем случайные» (Systematic errors often have more influence on a measurement than random errors).

В последние 40 лет в метрологии наиболее активно развивается направление, основанное на понятии неопределенностей и статистических методах оценивания, и широко внедряется Руководство по неопределенностям (Guide) [5]. Хотя практические потребности в оценивании СП постоянно сохранялись, вопросы исследования СП оказались на втором плане.

В настоящее время в связи с потребностями измерительной практики интерес к исследованиям СП вновь повышается [3, 6], хотя современная теория СП еще не сформировалась (по существу, теория СП до сих пор остается на уровне классических работ [1, 2]). При этом на практике в различных областях измерений выработан ряд полезных приемов работы с СП, и их систематизация может быть актуальна для развития теории СП. Аналогично, в области навигации также приходится решать задачи, связанные с выявлением, учетом и снижением СП, и накоплен определенный практический опыт.

С другой стороны, в метрологии, прикладной статистике и теории моделирования развивается ряд направлений, методология аппарат которых мог бы составить основу для анализа и формализации СП. Одним из них, по-видимому, являются методы проверки адекватности измерительных моделей [7, 8].

Цель данного доклада состоит в том, чтобы провести исходный анализ практических операций при работе с СП, с использованием методов проверки адекватности моделей. По существу, это попытка наметить развития [6] – в одном из направлений с использованием аппарата адекватности моделей [7, 8].

1 Общее понятие систематической погрешности

Начиная с истоков измерительной деятельности, исследователей всегда интересовали регулярные и нерегулярные влияния на результаты измерений. Регулярными (для отдельного измерения) принято называть потенциально познаваемые (управляемые) влияния, которые, в принципе, могут быть точно предсказаны (оценены) при наличии полных и точных данных об элементах процедуры. К нерегулярным относят влияния, которые принципиально непредсказуемы и неуправляемы.

Позднее на основе представлений о регулярных влияниях сложилось понятие о систематических погрешностях, а на основе нерегулярных – о случайных погрешностях. В настоящее время систематическая погрешность, в соответствии с [9], определяется как «составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся по повторных измерениях одной и той же величины».

Основы теории систематических погрешностей заложены в классическом труде М. Ф. Маликова [1], где дана исходная классификация СП, изложены принципы выявления и общие методы исключения постоянных СП. Эти положения развиты в работах С. Г. Рабиновича – прежде всего, в [2], где представлены эвристические методы оценивания СП и их суммирования со случайными

¹ Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник.

составляющими, а также в последующих его работах [10]. Интересный анализ составляющих погрешностей изложен в [4], где впервые сопоставлены две концепции – погрешностей и неопределенностей. Кроме того, тщательный и методичный анализ СП конкретного вида измерений приведен в [3].

О разнообразии проблем анализа СП дают наглядное представление два, в определенном смысле противоположных примера, каждый из которых можно считать типовым.

В первом случае речь идет о выявлении или обнаружении СП при аттестации устройства для прецизионных измерений углов, когда получен большой объем экспериментальных данных, но априорная информация о возможных СП незначительна.

При формальной обработке данных как случайной выборки получены оценки погрешностей, соответствующие уровню первичного эталона, что явно неправдоподобно. В то же время, простое разбиения данных на группы или классическая процедура дисперсионного анализа [11] позволяют выявить составляющие СП, их приближенно оценить и в итоге получить оценки суммарных погрешностей, которые реалистичны при заданных условиях измерений.

Второй пример относится к аттестации высокоточного морского бортового гравиметра [12]. В этом случае известны основные физические факторы, обуславливающие СП, а также изучены зависимости от них составляющих погрешностей. Это позволяет внести ряд поправок на основные эффекты, оценить неисключенные остатки СП и выполнить их суммирование. В частности, при обработке гравиметрических данных по галсам съемки в показания гравиметра вводится ряд поправок [13], в том числе:

- за эффект Этвеша;
- за смещение нуля;
- за воздействие вертикальных ускорений;
- для редукации показаний гравиметра на эллипсоид
- суммарная динамическая поправка за влияние: наклонов гироплатформы, горизонтальных ускорений, остаточный эффект орбитального движения корабля и смешанные эффекты
- приливная поправка.

Кроме того, при решении ряда геофизических задач дополнительно вводится поправка Буге.

Следует подчеркнуть, что возможность введения поправок основана на большом объеме геофизических исследований; однако все же введение поправок возможно не на все составляющие СП. Поэтому при испытаниях гравиметров после внесения возможных поправок выполняют суммирование других СП, а также неисключенных остатков СП, в том числе:

- погрешность градуировочной характеристики;
- от воздействия качки носителя;
- от воздействия вертикального ускорения;
- от воздействия синусоидальной вибрации;
- от воздействия изменения температуры;
- от воздействия внешнего магнитного поля;
- из-за неточного определения скорости корабля и широты места.

Эти примеры наглядно показывают, что СП как объект исследования не менее богат и сложен, чем случайная погрешность (СлП), для которой имеется развитая теория. Отсутствие теории СП сдерживает разработку эффективных практических методов, и часто вопросы СП решаются эвристически, на уровне «искусства экспериментатора». В то же время СП, как показано в [2, 4, 6, 14], играют решающую роль в структуре погрешности измерения и средства измерений (СИ).

2 Классификация систематических погрешностей

Понятие СП вводится в теории погрешностей [1, 2] феноменологически, поэтому его трактовка однозначна только для постоянной СП. Традиционно выделяют еще несколько групп СП, включая:

- ступенчатые СП (кусочно-постоянные), обусловленные фактором, постоянным на определенных интервалах времени, но изменяющимся при переходе к другому интервалу;
- прогрессирующие СП (тренды), возрастающие или убывающие под влиянием фактора, эффект от которого накапливается;
- периодические СП, которые обусловлены циклическим процессом;
- изменяющиеся по сложному закону СП, которые являются комбинацией нескольких эффектов отмеченного выше вида.

Ясно, что приведенное разделение не является строгой классификацией, а скорее рабочим разбиением СП на группы. Более того, и разделение на СП и СлП является условным и зависит от решаемых задач. Таким образом, характер составляющей – СП или СлП – часто определяется областью распространения или локализацией рабочей модели. Относительный характер СП (как и СлП) проявляется в возможности взаимного перехода составляющих из одной группы в другую, и наоборот. Так, СлП процедуры градуировки СИ проявляется как СП полученной градуировочной характеристики при использовании данного СИ, а постоянная СП конкретного образца СИ может проявляться как СлП на множестве образцов СИ одного типа (СлП типа СИ).

Выявление и оценивание СП существенно различается в зависимости от характера их изменений во времени. Методически самым сложным является выявление строго постоянной СП, поскольку ее невозможно обнаружить в рамках данной измерительной процедуры. Поэтому необходимо исследовать физические источники СП, в том числе, путем привлечения дополнительных СИ.

Аналогичным образом действуют и при определении СП известного функционального вида. Например, при градуировке высокоточного гравиметра последовательно реализуют наклоны основания на заданные углы, и для каждого определяют отклонения показаний гравиметра от эталонных значений [12]. Далее путем обработки данных получают искомую зависимость СП в заданном диапазоне.

На практике наибольший интерес представляет ситуация, когда на регулярные или иррегулярные физические процессы накладываются случайные шумы. В этом случае необходима дополнительная информация, в первую очередь, о функциональном виде тренда и корреляционных функциях шумов.

Учитывая современное распространение понятия неопределенности и Руководства [5], полезно выяснить соотношение этого понятия и СП. В этом аспекте интересна работа [4], в которой впервые вводилось понятие «неопределенности» как альтернативы погрешности. В ней параллельно излагаются процедуры (схемы) оценивания случайных, систематических и суммарных погрешностей / неопределенностей, и показана логическая эквивалентность этих подходов и соотношения получаемых результатов. Авторы отдают некоторое предпочтение понятию «неопределенности», исходя из традиционной аргументации, что «истинное значение измеряемой величины (а следовательно, и погрешности) неизвестны». Эта работа, в том числе, показывает, что содержательное рассмотрение систематических эффектов возможно реализовать в рамках каждого из двух подходов.

3 Уровни метрологических моделей при исследовании систематических погрешностей

Как следует из предыдущего, систематические погрешности выражают регулярные влияния в рамках детерминированной модели, которая используется в определенной области - для совокупности однородных измерений, в рамках серии измерений или для отдельного измерения. Аналогичное верно и для СП средств измерений; здесь можно говорить о типе СИ, конкретном СИ, или даже отдельном запуске СИ. Таким образом, вопрос о взаимосвязи СП и метрологических моделей оказывается ключевым.

Локальный характер понятия СП обуславливает определенную иерархию моделей СП по их виду и локализации их действия. Можно выделить следующие уровни:

I) Различные постоянные СП, которые могут различаться по области постоянства:

а) постоянные СП – априорно неизменные при повторении измерений или для типа СИ: $\theta = \theta_0$;

б) локально-постоянные СП – неизменные в рамках:

– однородной серии измерений: $\theta_{ij} = \theta_{j0}$,

– определяемые для конкретного СИ : $\theta_{ij} = \theta_j$,

– в одном запуске СИ: θ_{ij} .

II) Разнообразные функциональные СП, которые могут различаться по области стабильности параметров:

в) функциональные СП – функции известного вида от времени (или заданных аргументов), которые сохраняют параметры при повторении измерений или для типа СИ:

$$\theta_{ij}(t) = f(\alpha_1, \dots, \alpha_m, t) ;$$

г) функциональные (локальные) СП - функции известного вида от времени (или заданных аргументов), которые сохраняют параметры в рамках однородной серии измерений или для конкретного СИ, или в одном запуске СИ

$$\theta_{ij}(t) = f(\alpha_{1i}, \dots, \alpha_{mi}, t) ;$$

д) функциональные (уточненные) СП - определяемые в запуске по дополнительной информации (например, при испытаниях)

$$\theta_{ij}(t) = f(\alpha_{1i}, \dots, \alpha_{mi}, \omega, t) .$$

Уровни локализации СП определяются областью адекватности соответствующих моделей. Таким образом, наблюдается определенная двойственность СП и моделей.

Поэтому все приемы работы (операции) с СП могут быть переформулированы как методы проверки адекватности соответствующих моделей. По существу, многие СП можно было бы определить как погрешности неадекватности относительно определенной метрологической модели.

Как отмечалось, основные виды операций с СП – выделение СП, внесение поправки и оценивание неисключенных СП.

Поэтому выделение СП можно рассматривать как проверку адекватности соответствующей модели. Нахождение (оценивание) СП с целью внесения поправки, согласно этой логике, аналогично операции проектирования на пространство, определяющее модель. Таким образом, поправка трактуется как проекция на модель.

4 Выделение составляющих СП

Прежде всего, следует отметить, что выявление основных систематических факторов, обуславливающих составляющие СП, может быть основано на различных принципах. В дальнейшем это определяет также проблемы формализации выделенных факторов и формирование моделей СП.

Хотя основное содержание доклада относится, прежде всего, к анализу СП СИ, но в данном случае целесообразно рассмотреть схему формирования составляющих погрешностей применительно к измерительной процедуре. Поэтому при выделении составляющих целесообразно опираться, прежде всего, на структурные схемы измерительной процедуры [14, 15].

Например, один из вариантов такого подхода приводит к разбиению на составляющие погрешностей, приведенному далее в табл. 1.

В табл. 1 также указан характер составляющих - систематические (СП) или случайные (СлП).

Таблица 1 - Основные составляющие погрешности измерения в соответствии с его элементами

Обозначения	Причины (факторы), обуславливающие погрешности (П)	Наименования составляющих	Характер составляющей
ξ_1	несовершенство измерительной модели ОИ	пороговое несоответствие модели ОИ	СП
ξ_2	использование «вторичных» величин (при косвенных измерениях)		СП + СлП
ξ_3	неточность установки СИ	установочные П, П горизонтирования	СП
ξ_4	неточность выполнения операций по подготовке СИ к применению		СП + СлП
ξ_5	искажение ФВ ввиду взаимодействия СИ с ОИ		СП + СлП
ξ_6	наличие помех (мешающих воздействий) на входе СИ		СлП
ξ_7	несовершенство свойств СИ, несоответствие МХ реальным свойствам СИ	основные погрешности СИ	СП + СлП
ξ_8	реакция СИ на изменения влияющих величин	дополнительные погрешности СИ	СП + СлП
ξ_9	инерционность СИ, скорость изменения входного сигнала СИ	динамические погрешности СИ	СП + СлП
ξ_{10}	неточность реализации метода измерений	методические П	СП
ξ_{11}	помехи на выходе СИ		СлП
ξ_{12}	специфика регистрации сигнала или отсчитывания показаний СИ	П регистрации, отсчитывания	СП + СлП
ξ_{13}	несовершенство модели экспериментальных данных		СП + СлП
ξ_{14}	несовершенство алгоритма обработки данных		СП + СлП
ξ_{15}	неточность реализации алгоритма		СП + СлП

	обработки с помощью программ		
ξ_{16}	несовершенство процедур передачи и ввода данных		СП + СлП
ξ_{17}	несовершенство вычислительного устройства		СП + СлП

Разумеется, перечень возможных составляющих может быть неполным (открытым), поскольку он ориентируется на «типовую» структуру измерительной процедуры [14]. Для специальных областей или специфических измерительных задач он может быть расширен. Более того, имея в виду необходимость расширения анализа и на область навигационных приложений, его можно будет расширить и в этих аспектах.

Отметим, что после выявления всех СП, по возможности, вводят поправки на некоторые составляющие и оценивают неисключенные остатки СП. Поэтому в табл. 1 представлены либо «неисправленные» СП, либо остатки СП.

5 Задачи проверки адекватности моделей при исследовании систематических погрешностей

5.1 Как отмечено выше, одной из наиболее сложных и важных задач является выявление (обнаружение) систематических погрешностей.

Для выявления наличия СП в последовательности результатов наблюдений x_1, \dots, x_n (выделения СП на фоне СлП) можно использовать некоторые специальные статистики и статистические критерии.

По существу, основные операции здесь эквивалентны проверке гипотезы однородности выборки. Поэтому могут использоваться, прежде всего, непараметрические критерии однородности [11, 15]. К ним относятся, например, ранговые критерии:

- критерий знаков,
- критерий серий,
- критерий Уилкоксона,
- Сиджела-Тьюки.

Приведенные критерии являются простыми и непараметрическими, в частности, не требуют априорной информации о распределениях данных. Это особенно существенно при предварительном анализе данных, в том числе, когда имеются подозрения о наличии СП и, следовательно, строгая статистическая модель не вполне обоснована.

Наиболее известный критерий для выявления монотонных СП – это критерий Аббе [11]. В критерий Аббе проверяется нулевая гипотеза о постоянном среднем данных:

$$H_0: Mx_k = c,$$

против альтернативы наличия монотонного сдвига данных:

$$H_1: Mx_{k+1} = Mx_k + h.$$

Статистика Аббе определяется как отношение двух оценок рассеивания:

$$r = \sigma_a^2 / S^2,$$

где S^2 – классическая выборочная дисперсия,

S_a^2 – оценка дисперсии, определяемая как средний квадрат последовательных разностей [11]:

$$S_a^2 = \sum (x_{k+1} - x_k)^2 / 2(n-1).$$

При проверке гипотезы H_0 критическая область имеет вид:

$$D(\alpha) = \{ r < r_{\min}(n, \alpha) \},$$

то есть, малые значения отношения r свидетельствуют о том, что в выборке присутствует систематический сдвиг.

Критерий Аббе можно также использовать и для выявления СП другого вида, в том числе, рандомизированных; при этом альтернатива имеет вид:

$$H_2: x_{k+1} = x_k + y_k,$$

где y_k – некоррелированные приращения с дисперсией $D y_k = \sigma_0^2$.

Развитием подхода Аббе, по существу, является вариация Аллана, которая позволяет также оценить некоторые СП. Кроме того, вариация Аллана может выявлять другие виды погрешностей, в том числе, нестационарных. В связи с этим она широко применяется в навигационной практике, при оценивании характеристик навигационной аппаратуры [16].

5.2 Выбор числа наблюдений при измерениях

Поскольку увеличение количества наблюдений позволяет в общем случае снизить лишь СлП, то правила выбора рационального числа наблюдений при измерениях устанавливают, исходя из соотношения между СП и СлП. Поскольку СП – лимитирует достижимую суммарную погрешность измерения, то выбирают число наблюдений так, чтобы в каком-то смысле СлП была малой относительно СП. Таким образом, задачу выбора числа наблюдений можно представить как задачу проверки значимости СлП.

Например, можно выбирать число наблюдений так, чтобы выполнялось одно из следующих условий:

- 1) СлП результата измерения пренебрежимо мала по сравнению с его СП, т. е. при суммировании СлП не учитывают [2];
- 2) СП результата многократного измерения заметно ниже погрешности результатов однократных наблюдений;
- 3) суммарная погрешность результата измерения, оцененная с учетом СлП и СП, незначительно (не более чем на заданную долю α) превосходит его СП [15].

Очевидно, количественные соотношения, получаемые на основе приведенных эмпирических правил, зависят от принимаемых моделей СП и СлП, от способов оценивания их характеристик, а также от способов суммирования СП и СлП.

Аналогичные соотношения имеют место и при определении МХ СИ, например, при планировании экспериментов с целью построения градуировочных характеристик СИ [15].

Выводы

В связи с необходимостью учитывать систематические погрешности в измерительных и навигационных задачах, возникает потребность в общей методологии их анализа, направленной на разработку методов их оценивания и возможного уменьшения.

Представляется целесообразным использовать для анализа систематических погрешностей подходы и аппарат, разработанные в рамках теории моделирования и методов проверки адекватности моделей. Такой аппарат мог бы в дальнейшем составить основу для анализа и формализации СП, что позволило бы повысить достоверность существующих практических процедур работы с СП, а также разрабатывать новые методы.

Кроме того, формализация основ СП направлена и на разработку общих методов анализа погрешностей в целом, с учетом как случайных, так и систематических составляющих.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 16-08-00801).*

Литература

1. **Маликов, М. Ф.** Основы метрологии. – Москва, 1949.
2. **Рабинович, С. Г.** Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978.
3. **Сох, М. G.** Systematic-error modeling, with application to complex permittivity measurement. – 16th IMEKO – TC4 Symposium. – Florence, 2008.
4. **Campion, P. J., Burns, I. E., Williams, A.** A code of practice for the detailed statement of accuracy. – NPL, London, 1973.
5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML) // ISO, 1993
6. **Granovsky, V. A., Siraya, T. N.** Systematic errors: methodology of detection, elimination, and evaluation. – Proceedings of XX IMEKO World Congress, 2012, Busan, Republic of Korea, 7 с.
7. **Granovsky, V. A., Siraya, T. N.** «Model adequacy in measurements: estimation and improvement» - “Advanced mathematical & Computational Tools in Metrology VIII” – Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, World Scientific, 2009.
8. **Грановский, В. А., Сирая, Т. Н.** Проблема адекватности моделей в измерениях // Датчики и системы, 2007, № 10.
9. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения
10. **Rabinovich, S. G.** Measurement errors and uncertainties: theory and practice. – 3 edition, Springer-Verlag, New York, 2005.
11. **Браунли, К. А.** Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977.
12. **Krasnov, A. A., Nesenyuk, L. P., Peshekhonov, V. G., Sokolov, A. V., Elinson, L. S.** Integrated Marine Gravimetric System. Development and Operation Results. Gyroscopy and Navigation. 2011. Т. 2. № 2. С. 75-81.
13. Инструкция по морской гравиметрической съемке. ИГ-78. МО РФ, ГУНиО. 1978.
14. **Грановский, В. А., Сирая, Т. Н.** Методы обработки данных при измерениях – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
15. **Лячев, В. В., Сирая, Т. Н., Довбета, Л. И.** Метрологические основы теории измерительных процедур. – СПб: Изд-во «Элмор», 2011. – 416 с.
16. **Allan, D. W., Ashby, N., Hodge, C. C.** The Science of Timekeeping. – Application Note 1289, Hewlett-Packard Company, 1997.