



СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ
В СУДОСТРОЕНИИ
И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ

СУДОМЕТРИКА 2018

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

15-17 ОКТЯБРЯ 2018 г.
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

concept
tj
TECHNOLOGIES



ПРИБОРЫ



ROHDE & SCHWARZ

СЕДЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ
В СУДОСТРОЕНИИ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ
СУДОМЕТРИКА-2018**

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Санкт-Петербург
15–17 октября 2018 г.

Материалы Седьмой Международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2018)» / ред. В. А. Грановский. – СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018.–190 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 д. т. н., профессора, члена Академии навигации и управления движением, члена Метрологической академии, Заслуженного метролога РФ В. А. Грановского.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ	7
Подготовка специалистов в области метрологии - ключевая проблема качественного развития техники В. А. Грановский.....	8
Компетентность организации в области поверки. Проверка прав и обязанностей метрологической службы Д. Г. Грязин.....	11
Измерения скорости звука в воде Ю. А. Ломовацкий	14
Актуальные задачи метрологического обеспечения в области измерений толщины покрытий Е. Б. Брюховецкая, Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалев.....	16
Комплексные исследования процессов обеспечения качества продукции машиностроительных предприятий и формирование системы нормативных документов для повышения эффективности производства О. С. Салыкова, Б. Р. Салыков, А. Б. Амандыкова, А. У. Бугубаева, И. В. Иванова.....	19
Актуальные вопросы разработки и использования методик измерений в приборостроении и машиностроении Д. Г. Грязин, Т. Н. Сирая.....	24
Обоснование уравнения размагничивания корабля Ю. М. Иванов, В. Г. Семенов.....	30
ИСПЫТАНИЯ	32
Особенности метрологического обеспечения испытаний опытных образцов изделий А. А. Ложечник, Н. Н. Скориантов.....	33
Обеспечение требуемой достоверности результатов метрологических испытаний Э. И. Цветков, Е. С. Сулоева	35
Аттестация испытательного оборудования в метрологическом обеспечении испытаний продукции Г. С. Слепынский, Н. Н. Скориантов	42
Интервальный критерий окончания переходного процесса в измерительной цепи при испытаниях Ю. С. Бехтин, А. А. Лупачев, В. А. Логинов, Е. С. Еличева, А. Р. Пецинярж.....	44

Допустимые уровни подводного шума при сертификации гражданских судов А. М. Еняков, О. А. Панин	48
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	54
Особенности проведения метрологической экспертизы на этапе технического проектирования кораблей и судов Н. Н. Скориантов	55
Аттестация испытательного оборудования. Практические рекомендации Ю. Г. Солонецкий, Ю. И. Шевелев, А. В. Ступников.....	58
Современные подходы к выполнению метрологических работ в незаглушенном измерительном бассейне А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев, И. В. Черников.....	61
Результаты метрологической аттестации программно-аппаратного имитационного комплекса стенда отладки и моделирования программного обеспечения В. В. Беляева, Е. А. Горбунов, В. А. Грановский, А. И. Стариков, В. В. Прокопович, А. В. Шафранюк	65
Разработка метода определения электрической поляризуемости частиц в жидкости Г. В. Шувалов, М. В. Кручинина, В. М. Генералов, И. В. Минин	70
Методика оценивания параметров расположения контрольного элемента стенда качки В. Е. Киреенков, А. М. Мягков, Н. Л. Яворовская, О. А. Яковенко	74
Метрологические аспекты измерений уровня пульсаций в источниках питания постоянного тока К. А. Бондин, А. А. Зуйков, С. И. Липатов	76
О возможности использования высокоточного инновационного датчика угла для контроля электромеханических призм Ю. Л. Аванесов, В. В. Беляева, А. С. Воронов, К. С. Гороховский, В. А. Грановский	79
КАЛИБРОВКА	82
Межлабораторные сличения как способ контроля качества метрологических работ на предприятии А. С. Кривов, Е. А. Смирнова.....	83
Результаты пилотного эксперимента по межлабораторным сличениям результатов калибровки электроизмерительных приборов К. А. Бондин, П. И. Николаев, А. С. Кривов, Е. А. Смирнова	86

Особенности калибровки приёмников векторных и скалярных величин гидроакустического поля в условиях отражающего бассейна А. Н. Матвеев, Г. С. Некрич, И. В. Черников.....	91
О низкочастотной калибровке гидрофонов в незаглушенном бассейне малых размеров Н. Г. Щерблюк.....	94
Измерение коэффициентов отражения материалов в камерах малого объема установок для градуировки гидроакустических преобразователей А. И. Щелкунов, Г. С. Некрич.....	101
Определение метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений с помощью компаратора лазерного интерференционного В. П. Филиппов, З. В. Фомкина.....	104
Определение вместимости танков судна типа «Волгонефть» электронно-оптическим методом А. В. Кондаков.....	107
Метрологическое обеспечение измерений массы сжиженного природного газа в танках наливных судов косвенным методом статических измерений Р. Р. Нурмухаметов.....	109
СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ	111
Разработки Сибирского института метрологии по созданию средств измерений параметров нефтепродуктов и перспективы их применения для мониторинга качества Г. В. Шувалов, Т. В. Васильева.....	112
Эталонная база в области измерений крутящего момента силы Б. А. Черепанов.....	117
Дистанционное управление измерениями на государственном рабочем эталоне 1 разряда единицы длины Е. Б. Брюховецкая, Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалев.....	119
Модернизированная установка для измерений и воспроизведения амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред в системе передачи размеров воспроизводимых единиц рабочим средствам измерений В. Г. Бакшеев, В. И. Панин, А. В. Шулатов, В. В. Хомяков.....	123
Цифровые запоминающие осциллографы высокого разрешения А. А. Дедюхин, С. С. Чистякова.....	125

Двухосное поворотное устройство для калибровки БИНС А. В. Полушкин, И. В. Слистин, Д. Г. Борчанинов, С. Ф. Нахов, А. С. Казаков, И. Е. Виноградов.....	128
Особенности совместного использования нескольких метрологически аттестованных измерительных систем с программным обеспечением А. В. Полушкин, Д. Г. Борчанинов, С. Ф. Нахов, Р. М. Юмагузин, А. С. Максаев, А. А. Янковский.....	134
Угловое согласование трехкомпонентных магнитометров А. А. Затеев, В. Г. Семенов.....	140
Резонансный преобразователь энергии качки с обратной связью А. П. Белянцев, Д. Г. Грязин.....	147
Использование технологий трехмерной печати для производства микромеханических датчиков А. И. Скалон, А. А. Тыртычный.....	150
ОБРАБОТКА ДАННЫХ	157
Статистический анализ результатов измерений: методы, критерии проверки гипотез, проблемы применения и их решение Б. Ю. Лемешко, П. Ю. Блинов, И. В. Веретельникова, С. Б. Лемешко, А. Ю. Новикова.....	158
Обобщенные модели данных в измерительных задачах. Спектральные и временные представления Т. Н. Сирая.....	168
Метрологический подход к обоснованию вариации Аллана как характеристики рассеяния данных Т. Н. Сирая.....	172
Влияние неидентичности элементарных приёмных каналов антенны на погрешность определения пеленга целей Н. Г. Воронина, А. С. Ефимова, В. Н. Тимофеев.....	177
Способы оценки уровня адекватности имитационного программно-алгоритмического обеспечения В. В. Беляева, В. А. Грановский, В. В. Прокопович, А. В. Шафранюк.....	180
Оценка погрешности определения параметров экранирования защитных оболочек на этапе их проектирования О. К. Епифанов, И. А. Салова.....	187

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ

Подготовка специалистов в области метрологии - ключевая проблема качественного развития ТЕХНИКИ

В. А. Грановский

Метрологическая служба
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор"
г. С.-Петербург, Россия
vgranovsky@eprb.ru / valgr39@mail.ru

Аннотация — Анализируется проблема снижения уровня качества подготовки специалистов в области метрологии. В качестве источника проблемы указано отчуждение предприятий промышленности от сферы подготовки кадров. Представлен взгляд со стороны промышленности на современное состояние сферы подготовки кадров. Сформулированы предложения по обеспечению существенного участия предприятий промышленности в процессе подготовки специалистов в области метрологии.

Ключевые слова — метрология; специалист; подготовка; сфера

I. ВВЕДЕНИЕ

Метрологическое обеспечение является необходимым компонентом процессов создания и эксплуатации технических устройств. Его роль повышается по мере усложнения техники. В свою очередь, уровень метрологического обеспечения критическим образом определяется квалификацией работников, выполняющих метрологические функции и решающих нестандартные метрологические задачи. На предприятии, где создается новая техника, а также во многих эксплуатационных организациях основную массу метрологической работы выполняют разработчики, технологи и производственники. На долю сотрудников метрологической службы приходится выполнение таких метрологических функций, как управление парком средств измерений, организация метрологической экспертизы документов и изделий на этапах жизненного цикла, метрологическое обеспечение различных процедур подтверждения соответствия изделий, проведение особо точных и арбитражных измерений. Сферы ответственности указанных групп работников – метрологов «по необходимости» и метрологов «по должности» - взаимосвязаны как сообщающиеся сосуды. Чем ниже уровень компетентности работников одной группы, тем большую часть метрологической работы приходится выполнять сотрудникам другой группы, что, при неизбежной ограниченности ресурсов, приводит к снижению общего уровня качества работы. Поэтому проблема качества подготовки специалистов в области метрологии должна рассматриваться в двух аспектах: метрологическая подготовка специалистов для различных прикладных областей и подготовка специалистов-метрологов. Эти аспекты связаны неразрывно и потому одинаково важны.

II. Суть проблемы и принцип решения

Проблема качества подготовки специалистов в области метрологии состоит в очевидном несоответствии компетенций выпускников вузов требованиям профессиональной метрологической работы в условиях промышленного предприятия. Источником проблемы является отчуждение предприятий промышленности от системы подготовки кадров в области метрологии. Указанное отчуждение носит комплексный характер.

Во-первых, требования промышленности не структурированы и не оформлены. Во-вторых, предприятия не включены на системном уровне в процесс обучения. В-третьих, и это особенно важно, предприятия не выступают в качестве заказчиков в отношении системы подготовки кадров, что находит свое выражение на этапах испытаний специалистов в процессе их подготовки. Таким образом, предприятия промышленности, являясь, несомненно, потребителями «продукции» системы подготовки кадров, лишены статуса заказчика.

Конкретная схема взаимодействия заказчика и исполнителя (производителя) в области создания новой техники определяется контрактом и действующими нормативно-правовыми актами. Однако традиционно такая схема включает в себя, со стороны заказчика, формализацию требований к продукции (разработку и согласование технического задания) и проведение приемо-сдаточных процедур (процедур подтверждения соответствия продукции установленным требованиям). При создании особо сложной и/или ответственной продукции заказчик осуществляет в той или иной форме мониторинг (сопровождение) производственного процесса. Иными словами, заказчик самым непосредственным образом интегрирован в систему создания продукции. Представляется целесообразным реализовать в сфере подготовки кадров указанный традиционный принцип взаимодействия заказчика и производителя.

Может ли такой принцип быть реализован буквально, в традиционной форме, в указанной сфере? Ответ на этот вопрос, очевидно, должен быть отрицательным в силу того, что «продукция» сферы подготовки кадров существенно сложнее промышленной продукции. В частности, невозможно однозначно формализовать требования к специалисту в области метрологии и трактовать результаты

испытаний (экзаменов и защиты выпускных работ). Из этого следует, что традиционный принцип должен быть усилен, в первую очередь, за счет большей вовлеченности предприятий промышленности в образовательный процесс.

III. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРЫ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ

Сегодняшнее состояние сферы подготовки кадров характеризуется наличием трех субъектов – Министерства науки и высшего образования (Минобрнауки), Министерства труда и социальной защиты (Минтруд) и Министерства промышленности и торговли (Минпромторг). Эти субъекты взаимодействуют таким образом, что реальные потребители кадров - предприятия - из этого взаимодействия исключены. Результатом подобной организации являются следующие особенности основных составляющих системы (и процесса) подготовки кадров.

Нормативная база. Минобрнауки разрабатывает федеральные государственные образовательные стандарты (ФГОС), а Минтруд - профессиональные стандарты. Ни те, ни другие даже не согласуются с предприятиями, не говоря об участии последних в разработке. Более того, имеются сомнения в том, что указанные ведомства согласуют содержание разрабатываемых документов и что Минпромторг в этом участвует.

Учебный процесс. Работники предприятий не участвуют в его организации и слабо, случайным образом привлекаются к участию в реализации.

Контроль и испытания. На финальном этапе учебного процесса – сдача государственных экзаменов и защита выпускных работ – привлекаются работники промышленности, которые включаются в состав государственных экзаменационных комиссий. Однако их участие в работе комиссий, как правило, остается формальным.

Кадровая база. Основная масса профессорско-преподавательского состава вузов не имеет системной связи с промышленностью. Контакты с промышленными предприятиями нерегулярны. В целом, можно констатировать, что основная масса преподавателей не участвует на постоянной основе в создании новой техники и поэтому не может служить посредником по передаче студентам знаний о новых технологиях.

Технологическая база. Лаборатории вузов оснащены, как правило, устаревшим оборудованием, причем разрыв с технологической базой предприятий промышленности увеличивается в силу роста сложности и стоимости новых средств измерений и испытаний, тренажеров и имитаторов. Лучше обстоит дело с оснащением вычислительной техникой: компьютерные классы широко распространены. Однако алгоритмическое и программное обеспечение ограничивается, как правило, стандартными пакетами обработки данных и не включает в себя создаваемых в промышленности новых программных продуктов.

Подводя итог, можно утверждать, что методологическое, технологическое и кадровое отставание вузов от предприятий промышленности усиливается, поскольку возникла чрезвычайно опасная положительная обратная связь: каждый новый этап технологического и методологического развития промышленности укрепляет и усиливает причины отставания вузов.

IV. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

Представляется естественным, что решать обозначенную выше проблему качества подготовки специалистов в области метрологии следует, проводя мероприятия, характер которых является "зеркальным" по отношению к источникам и причинам возникновения (и консервации) проблемы. Ниже представлены основные из указанных мероприятий.

Нормативно-правовые акты для сферы подготовки кадров, включая метрологическую подготовку специалистов различных отраслей промышленности и подготовку специалистов-метрологов, а также для сферы их производственной деятельности должны разрабатываться с непосредственным участием предприятий промышленности. Процесс разработки документов целесообразно организовать по схеме: *потребности промышленности* → *формальные требования к специалисту* (и их закрепление в профессиональных стандартах) → *требования к выпускникам* системы подготовки кадров (и их закрепление в федеральных государственных образовательных стандартах).

Первый этап схемы - это зона исключительной ответственности промышленности. Конкретные исходные данные (требования) формируются предприятиями и обобщаются Минпромторгом, причем обобщенные данные согласуются с предприятиями.

Второй этап предполагает совместную работу Минтруда и Минпромторга при участии представителей промышленных предприятий. В результате их работы должны выпускаться профессиональные стандарты, в максимальной степени соответствующие потребностям промышленности и максимально прозрачно подтверждающие это соответствие.

Третий этап схемы - это зона основной ответственности Минобрнауки, которое должно в обязательном порядке привлекать предприятия промышленности к разработке федеральных государственных образовательных стандартов. Последнее представляет собой лишь одну из необходимых форм вовлечения промышленности в образовательный процесс.

В целом, реализация указанной выше схемы направлена на обеспечение максимально возможного соответствия реальных требований предприятий к метрологическому уровню разработчиков, технологов, производителей и собственно метрологов, с одной стороны, формальными характеристиками компетентности работников (профессиональные стандарты), с другой стороны, и формальными показателями уровня метрологической подготовки выпускников вузов (федеральные государственные образовательные стандарты), с третьей стороны.

Образовательный процесс должен включать в себя, на регулярной основе, работников промышленности (в соответствии с индивидуальными контрактами) и предприятия (в соответствии с хозяйственными договорами). Прежде всего, работников промышленности следует привлекать к проведению занятий по метрологическим (в широком понимании) дисциплинам. Темы курсовых и выпускных работ должны формироваться по преимуществу на основе предложений предприятий. Экзамены (зачеты) по профильным дисциплинам должны приниматься исключи-

тельно работниками промышленности. Государственные экзаменационные комиссии следует укомплектовывать преимущественно работниками промышленности и возглавляться руководящими сотрудниками предприятий (заместителями генеральных директоров по качеству, главными инженерами, главными метрологами, непосредственно уполномоченными дирекцией специалистами).

Производственная практика должна быть организована серьезно. Это означает, что продолжительность практики следует кардинально увеличить с тем, чтобы практиканты могли быть включены в производственный процесс, получить серьезные, актуальные для предприятия, задания.

Проблема крайне недостаточного уровня технологического оснащения вузов может быть решена на практике только с участием предприятий промышленности. Поскольку в условиях стагнирующей экономики трудно рассчитывать на бюджетное финансирование, достаточное для ликвидации отставания уровня приборного и стендового оборудования, единственным способом решения вопроса остается обеспечение доступа вузов к метрологической и испытательной базе предприятий промышленности.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема неудовлетворительного качества подготовки специалистов в области метрологии рассмотрена с точки зрения интересов потребителя - промышленности, нуждающейся в компетентных кадрах и вынужденной довольствоваться выпускниками вузов. Проблема рассмотрена исключительно в рамках взаимоотношений системы подготовки кадров и системы индустриальной. Вне поля зрения остались, с одной стороны, источники проблемы, относящиеся к внутренней организации образовательного учреждения, с другой стороны, усилия промышленных предприятий, направленные на "доведение" молодого специалиста до необходимого уровня компетентности. Кроме того, не рассматривались вопросы послевузовской подготовки и, вообще, вопросы непрерывного образования. Указанные вопросы представляются второстепенными по сравнению с главным вопросом, а именно, отчуждением промышленных предприятий как непосредственных потребителей продукции сферы подготовки кадров. В докладе сделана попытка обосновать то положение, что без установления самого тесного взаимодействия указанных систем проблему качества подготовки специалистов, принципиально, не удастся решить.

Благодарности

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-08-00082).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федеральный закон от 03.12.2012 № 236-ФЗ "О внесении изменений в Трудовой Кодекс Российской Федерации и статью 1 Федерального закона "О техническом регулировании".
- [2] Федеральный закон от 29.12.2012 № 273-ФЗ (в ред. от 03.08.2018) "Об образовании в Российской Федерации".

Компетентность организации в области поверки. Проверка прав и обязанностей метрологической службы

Д. Г. Грязин

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация — Обсуждается опыт прохождения проверок компетентности метрологической службы ЦНИИ "Электроприбор" при получении аттестата аккредитации на право поверки средств измерений и подтверждения указанного права. Приводятся факты замечаний, которые трактуются экспертами как несоответствия критериям аккредитации. Выполнен анализ работы экспертов назначенной комиссии и специалистов Росаккредитации при выполнении процедуры проверки.

Ключевые слова – аккредитация, поверка, процедура проверки компетентности

I. ОСНОВЫ ПРОЦЕДУРЫ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

Метрологии всегда уделялось большое внимание в России. Одним из первых законов, который был подписан президентом Б.Н.Ельциным в условиях обвала рубля, краха экономики и осознания проигранной холодной войны, был закон о единстве измерений [1].

Сегодня процедура проверки компетентности любой организации на право поверки производится на основе критериев аккредитации [2], выработанных Минэкономразвития в обеспечение исполнения 412ФЗ [3]. В качестве же исполнительного органа, проверяющего выполнение этих требований, выступает Федеральное агентство по аккредитации (Росаккредитация). Субъектом этого права выступает метрологическая служба организации (МС).

Незабвенный В.М.Черномырдин на заре демократизации произнёс фразу, ставшую афоризмом: "Хотели как лучше, а получилось как всегда". Это выражение в полной мере можно взять за эпиграф к исследованиям процедуры подтверждения компетенции МС на право поверки. Например в статье 5 ФЗ 412 [3] с названием "Цели и принципы аккредитации" вообще отсутствует принцип объективности оценки. Права аккредитованных лиц ограничиваются двумя пунктами раздела 2 статьи 13, в то время как обязанностей значительно больше. С целью привлечения предприятий малого бизнеса к оценке соответствия критериям аккредитации [2] метрологических служб Гос. концернов и других промышленных предприятий. Росаккредитация создала реестр органов инспекции т.е экспертных организаций [4], сотрудники которых сдали квалификационные экзамены и стали инспекторами. При этом, как указано в п.28 [2] " Допускается привлечение к работам по оценке соответствия лиц, не отвечающих требованиям ... при условии выполнения ими работ по

оценке соответствия под контролем лиц, отвечающих требованиям ...". Это так называемые технические специалисты. Вот только нигде в документах не указано, сколько должно быть в комиссии инспекторов, а сколько технических специалистов. Справедливости ради следует отметить, что в настоящее время из 53 аккредитованных организаций только 31 сохранила право проведения инспекционных проверок, примерно половина экспертов и две третьих технических специалистов лишилась права экспертной деятельности в связи с их некомпетентностью и этот список продолжает расти [4].

Таким образом, в условиях отсутствия требований к объективности оценки соответствия МС критериям [2] взаимоотношения сотрудников МС проверяемой организации, сотрудников органов инспекции и Росаккредитации, наблюдающей за процессом, становится специфичными.

II. ОПЫТ ПРОВЕДЕНИЯ ДВУХ ПРОВЕРОК КОМПЕТЕНТНОСТИ Организации в области поверки средств измерений

В течение трёх последних лет проверку компетентности МС ЦНИИ "Электроприбор" проходила дважды. Первый раз в связи с появлением ФЗ №412, в котором прописана процедура "подтверждения компетентности", не смотря на то, что ранее эта процедура называлась "аккредитацией на право поверки" и срок действия аттестата на это право у нас не истёк. Второй раз в связи с требованием ФЗ №412 о подтверждении компетентность через два года.

Для проведения первой проверки Росаккредитация назначила специалистов казанского ООО "Центр экспертизы". Экспертная комиссия состояла из пяти экспертов, при этом, свидетельство об аттестации эксперта было лишь у одного, который в настоящее время лишился права экспертной деятельности.

Вторая проверка проводилась силами уже двух специалистов казанского ООО "АкЭксперт" из них тоже только один был аттестован в качестве эксперта и в настоящее время продолжает этот вид деятельности.

Очевидно, что большинство замечаний было сделано по руководству по качеству поверки (РК), т.к. именно этот документ определяет все особенности процедуры поверки в лаборатории, а критерии к организации этих работ определяются документом [2] и субъективным мнением экспертов. Очевидно и то, что выявление недостатков в рабо-

те поверителей с многолетним стажем работы занятие неблагодарное. И в первый и во второй раз эксперты отнеслись к этой процедуре формально, причём при второй проверке, их понимания существа процедуры поверки не хватило даже на требование прогреть эталоны и рабочие приборы, перед проведением сличения, что было отмечено поверителями после ухода экспертов. Отсутствие адреса предприятия в свидетельстве о поверке под указанием его названия, отсутствие в графе "условия проведения поверки" значения пульсаций сетевого тока, поступающего в лабораторию от специального стабилизатора, используемого для питания поверяемого прибора, вызвало претензии к качеству оформления свидетельств о поверке.

В связи с распространением действия ГОСТ ИСО МЭК 17025-2009 на поверочные лаборатории экспертами запрашиваются и такие документы как справки об измерении освещённости на рабочих местах, журналы техники безопасности и др документы не имеющие прямого отношения к процедуре, но важные с формальной позиции. Важным явился и вопрос о том, что в юридическом адресе филиала МС в посёлке Лебяжий был записан Комсомольский проспект, вместо переулкa. Это дало основание экспертам при второй проверке сделать вывод о том, что МС не владеет помещениями по указанному адресу. Возникли претензии и о том, что в РК не прописана процедура утверждения документа после его изменения, хотя из правил документооборота известно, что утверждает изменённый документ то же должностное лицо, что и предыдущий. Претензии обеих комиссий были и к требованию о разрешении конфликта интересов, не смотря на то, что главный метролог напрямую подчиняется директору, а директор подписал декларацию о разграничении полномочий между дирекцией и МС. Указанный документ не был принят во внимание, однако второй комиссией было предложено записать в РК фразу о том, что главный метролог следит за возникновением возможных конфликтов интересов и способствует их исключению.

На основе сделанных замечаний комиссии оба раза сделали вывод о несоответствии МС критериям и приостановила действие аттестата аккредитации на право поверки. При проведении процедуры поверки присутствовали и специалисты Северо-западного управления Росаккредитации, однако, ни в первом, ни во втором случае эти прикомандированные специалисты не имели профильного образования.

Следует отметить, что в борьбе с последствиями, вызванными недостаточной компетентностью экспертов, Минэкономразвития выпустило перечень нарушений, которые не влекут за собой приостановление аккредитации [5]. В частности, п. 5 этого перечня указывает, что "Отсутствие в документах системы менеджмента качества отдельных положений, предусмотренных критериями аккредитации, не влияющих на качество и результаты проведения аккредитованным лицом работ и услуг, а также на идентификацию объекта подтверждения соответствия" не должно приводить к приостановлению действия аттестата аккредитации. Однако и это не помешало приостановить действие аттестата аккредитации АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»».

Отметим, что проход на территорию режимных предприятий к числу которых относится большинство Гос.

корпораций производится только по предъявлению разрешительных документов. В связи с этой особенностью в п.9 раздела II известных критериев [2] указано, что эксперты, участвующие в проверках, должны при необходимости иметь такие документы, однако у большинства сотрудников предприятий малого бизнеса они отсутствуют. В связи с этим, такие предприятия берут в состав комиссий штатных сотрудников региональных ЦСМ, что противоречит требованиям п. 6 ст. 11 412 ФЗ, где указано, что "Эксперты по аккредитации не могут совмещать деятельность в определённой области аккредитации с соответствующей этой области аккредитации деятельностью по оценке соответствия и обеспечению единства измерений....".

С целью устранения замечаний по результатам первой проверки МС провела работы по корректировке РК, которые были рассмотрены экспертом Северо-Западного управления Росаккредитации и признаны достаточными для возобновления действия аттестата аккредитации. Любопытно то, что следующая комиссия сочла устранённые недостатки в РК недостаточными, а в некоторых случаях сделала прямо противоположные рекомендации. Мы повторно провели очередную корректировку документа, предъявили его в числе устранённых недостатков, что позволило возобновить и во второй раз действие нашего аттестата. Таким образом, накопленный опыт подсказывает, что при очередной проверке следует опять ожидать претензий к этому документу с последующим приостановлением действия аттестата аккредитации не смотря на требования приказа [5].

Отметим, что в соответствие с ФЗ 412 МС может оспаривать результаты проверки, однако поданная жалоба будет рассмотрена в течение 2 месяцев, а процедура повторной проверки по результатам устранения замечаний занимает вдвое меньше времени.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время не существует разъяснений о соответствии формализованных критериев аккредитации каким-либо признакам, что делает процедуру во многом субъективной. Очевидно, что основным таким критерием является умение поверителями проводить процедуру поверки и наличие при выполнении сличений аттестованных эталонов, т. е. обеспечение прослеживаемости единицы физической величины от эталона к рабочему средству измерения. Подход, основанный на привлечении малых предприятий к проверке деятельности МС, никак не способствует развитию промышленности в стране, приводит к неоправданным финансовым потерям, остановки производственного процесса на успешно работающем предприятии оборонно-промышленного комплекса, серьёзной загрузки чиновников в Росаккредитации.

Благодарности

Работа выполнена благодаря поддержке комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан по теме № BR05236539.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Закон РФ от 27.04.1993 № 4871-1 "Об обеспечении единства измерений".
- [2] Критерии аккредитации и перечень документов, подтверждающих соответствие заявителя и аккредитованного лица критериям аккредитации. Приложение №1 к приказу Минэкономразвития России от 30.05.2014 №326.
- [3] ФЗ №412 от 28.12.2013 "Об аккредитации в национальной системе аккредитации".
- [4] Росаккредитация. Федеральная служба по аккредитации / Эксперты и экспертные организации // [Электронный ресурс]: <http://fsa.gov.ru/index/staticview/id/298/> //
- [5] Приказ Минэкономразвития РФ №322 от 30.05.2014 "Об утверждении Перечня нарушений, которые при осуществлении федерального государственного контроля за деятельностью аккредитованных лиц не влекут за собой приостановления действия аккредитации" в редакции Приказа Минэкономразвития РФ №764 от 29.11.2016 "О внесении изменений в некоторые приказы Минэкономразвития России по вопросам аккредитации в национальной системе аккредитации".

Измерения скорости звука в воде

Ю. А. Ломовацкий

НИО-5 «Научно-исследовательское отделение метрологии гидрофизических измерений»

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Менделеево, Россия

lom_yuruk@mail.ru

Аннотация — Проведен анализ состояния и перспективы развития в области обеспечения единства измерений скорости звука в водной среде. Выявлена необходимость проверки технических и метрологических характеристик заявляемых производителями импортных средств измерений. Рассмотрены конструкторские решения и принципы построения созданного во ВНИИФТРИ Государственного первичного эталона единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012 и рабочего эталона единицы скорости звука в водной среде.

Ключевые слова — скорость звука, эталон, поверка, поверочная схема

I. ВВЕДЕНИЕ

Анализ результатов применения современных гидроакустических комплексов для обнаружения и измерений подводного шумоизлучения кораблей показывает, что для повышения точности измерений шумоизлучения и эффективности обнаружения целей необходим максимально полный и достоверный учет информации о гидрофизических характеристиках морской среды. Одной из основных таких характеристик является скорость распространения звука в воде.

Информация о скорости звука в море, как наиболее комплексном показателе состояния морской среды, требуется, в основном, для функционирования различных гидроакустических средств: эхолотов, гидролокаторов, систем гидроакустической связи, телеметрии и пр.

Основными гидрофизическими величинами, влияющими на плотность и вязкость воды, а значит и скорость звука, являются температура, соленость и гидростатическое давление.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Широкое использование данных о скорости распространения звука убедительно говорит о важности и необходимости системного изучения и измерений этой физической величины. Исходя из этого в 80-х годах прошлого столетия во ВНИИФТРИ начались работы по созданию эталонной базы в области измерений скорости звука в жидких средах. Итогом этих работ стали разработанные и утвержденные во ВНИИФТРИ нормативные документы ГСССД 190-2000 «Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Скорость звука при температурах от 0 до 100 °С и давлениях от 0,101325 до 100 МПа» и ГСССД 202-02 «Таблицы стандартных справочных данных. Морская вода. Скорость звука при соленостях 0...40 ‰, температурах 0...40 °С и избыточных давлениях

0...60 МПа», а также Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012 - ГПЭ.

В ГЭТ 201-2012 реализован времяпролетный импульсный метод измерений скорости звука в жидкостях. Конструктивные особенности эталонного измерительного преобразователя скорости звука обеспечивают его инвариантность к свойствам жидкости. Основной отличительной особенностью ГЭТ 201-2012 является наличие в его составе гидробака высокого давления.

ГПЭ состоит из трех установок.

Установка Э-1 (рис. 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 (габарит не более $\varnothing = 90$ мм, $h = 150$ мм);

Установка Э-3 воспроизводит единицу скорости звука в жидких средах при избыточном давлении от 0 до 15 МПа в диапазоне температур от + 15 до + 25 °С. Она предназначена для крупногабаритных изделий (габарит 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.



Рис. 1 Общий вид установки Э-1

Основным элементом при воспроизведении единицы скорости звука и передачи ее размера подчиненным средствам измерений скорости звука является эталонный измерительный преобразователь скорости звука — ЦИПСЗ

(рис. 2). Он инвариантен к свойствам исследуемой жидкости, таким как соленость, давление (0...60 МПа), температура (-5...40 °С). Это позволяет проводить исследования слабоагрессивных сред.

На данный момент в России эксплуатируются десятки типов измерителей скорости звука зарубежного производства. Из них единицы прошли испытания в целях утверждения типа средств измерений (СИ). Известно, что за рубежом в качестве точностной характеристики СИ используют неопределенность, а в РФ для рабочих СИ – погрешность, для эталонов – погрешность и неопределенность. Зарубежный производитель не уточняет, неопределенность какого типа он указывает в эксплуатационной документации СИ. Часто это бывает похоже на неопределенность типа А, что соответствует нашему понятию СКО. Таблица 1 иллюстрирует ситуацию с некоторыми импортными СИ, эксплуатируемыми в РФ.



Рис. 2 Эталонный измерительный преобразователь скорости звука – ЭИПСЗ

Как видно из таблицы 1, точностные характеристики исследованных измерителей далеки от заявленных.

ТАБЛИЦА 1. Ситуация с импортными СИ.

№ пп	Наименование СИ Производитель	Точностная характеристика, указанная в ЭД	Пределы допускаемой погрешности, определенные после испытаний в целях утверждения типа
1	2	3	4
1	SVP-20, SVP-25 RESON, Дания	0,25 м/с	0,6 м/с
2	SVP-70, SVP-75 RESON, Дания	(0,05...0,25) м/с	0,25 м/с

1	2	3	4
3	Midas SVP Valeport, Великобритания	0.02 м/с	Испытания не проводились
4	Midas SVX-2 Valeport, Великобритания	0.02 м/с	Испытания не проводились
5	miniSVP Valeport, Великобритания	0.02 м/с	0,25 м/с
6	miniSVS Valeport, Великобритания	0.017 м/с	Испытания не проводились
7	Digibar Pro ODOM, США	0.1 м/с	Испытания не проводились

Решить вопрос о реальных метрологических характеристиках СИ можно только проведением его калибровки, либо проведением испытаний в целях утверждения типа СИ и его последующих поверок. Это касается и импортных, и отечественных СИ.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Надводные корабли, глубоководные аппараты гидрографические суда, авиационные гидрографические буи и средства подводно-технического обследования акваторий оснащены СИ скорости звука в воде для получения информации о пространственно-временной структуре поля скоростей звука в океане. По экспертной оценке, на носителях в РФ находится несколько сотен комплектов аппаратуры, измеряющей скорость звука. Вопрос о поверке этих СИ до сих пор актуален.

Для обеспечения единства измерений в данной области разработан национальный стандарт ГОСТ Р 8.870-2014 "Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений скорости звука в жидких средах в диапазоне от 800 до 2000 м/с", возглавляемая Государственным первичным эталоном единицы скорости звука в жидких средах ГЭТ 201-2012, передающим размер единицы скорости звука вторичному эталону, рабочим эталонам 1-го и 2-го разряда и рабочим СИ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Микушин И.И., Серавин Г.Н. Методы и средства измерения скорости звука в море / Микушин И.И., Серавин Г.Н. - СПб. Судостроение, 2012.
- [2] Серавин Г.Н. Измерение скорости звука в океане. Л. Гидрометеиздат, 1979.
- [3] Белогольский В.А. Государственный первичный эталон единицы скорости звука в жидких средах. ГЭТ 201-2012 / Белогольский В.А., Саморукова Л.М., Сильвестров С.В. – ВНИИФТРИ // Труды конференции «Гидроакустика - 2013». 2013..

Актуальные задачи метрологического обеспечения в области измерений толщины покрытий

Е. Б. Брюховецкая, Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалев

отдел геометрических измерений
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
г. Санкт-Петербург, Россия
info@vniim.ru

Аннотация — В работе рассматриваются задачи метрологического обеспечения в области контроля качества покрытий в промышленности, типы мер толщины покрытий, их метрологические и технические характеристики. Представлены основные решения для обеспечения единства измерений и передачи единиц величин в области толщинометрии покрытий.

Ключевые слова — неразрушающий контроль, толщина покрытий, метрологическое обеспечение, толщиномеры, поверка, калибровка, меры толщины покрытий

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного развития энергетики, судостроительной, авиакосмической, оборонной, атомной промышленности и с учетом все возрастающих эксплуатационных требований к покрытиям возникает необходимость комплексного контроля качества покрытий, включая обеспечение единства измерений их геометрических, электромагнитных и механических свойств.

В соответствии с ГОСТ 9.008-82 [1] покрытие – это слой или несколько слоев материалов, искусственно полученных на покрываемой поверхности. Для придания поверхностям изделий необходимых свойств (износостойкость, стойкость к внешним воздействиям, долговечность, декоративность и т.д.) применяется широкий спектр разнообразных покрытий: металлические, лакокрасочные, неметаллические неорганические, пластмассовые, покрытия из специальных материалов, композиционные.

Можно выделить основные параметры, характеризующие свойства покрытий: геометрические, механические, физические, химические, оптические, коррозионные и декоративные.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Контроль толщины покрытий в условиях производства осуществляется в основном с помощью толщиномеров, принцип действия которых основан на различных методах неразрушающего контроля (магнитный, вихревой, акустический, рентгеновский и др.). Для калибровки и поверки толщиномеров необходимо использовать меры толщины покрытий, которые обладают характеристиками, идентичными объекту контроля, и охватывают весь диапазон измерений.

Меры толщины покрытий, прошедшие испытания в целях утверждения типа, разделены по материалам покрытий и оснований и классифицируются по типам:

1. МТП – меры толщины покрытий натурные:

- МП на МО - магнитное покрытие на магнитном основании;

- МП на НТО - магнитное покрытие на немагнитном токопроводящем основании;

- НТП на МО - немагнитное токопроводящее покрытие на магнитном основании;

- НТП на НТО - немагнитное токопроводящее покрытие на немагнитном токопроводящем основании.

2. ИТП – имитаторы толщины покрытия.

На данный момент в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [2] внесены меры толщины покрытий, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. МАТЕРИАЛЫ ОСНОВАНИЙ, ПОКРЫТИЯ И ТОЛЩИНА ПОКРЫТИЙ

Тип меры	Материал		Диапазон толщины покрытия, мкм
	Покрытие	Основание	
МП на МО	Никель	Сталь конструкционная	5-100
МП на НТО	Никель	Латунь, медный сплав	5-100
НТП на МО	Хром, медь, цинк, кадмий, олово, медь+хром, никель+медь+хром, олово+висмут	Сталь конструкционная	5-200
НТП на НТО	Олово+висмут, хром, медь, серебро, золото	Латунь, медный сплав, титановый сплав, алюминиевый сплав	5-200
ИТП	Кварцевое стекло, полиэтилен, фторопласт, органическое стекло	Магнитное, немагнитное	10-120000

В настоящее время при выполнении калибровки и поверки мер толщины покрытий измеряются действительное значение толщины покрытия, отклонение от плоскостности рабочей поверхности основания, отклонение от парал-

лельности поверхностей основания, шероховатость поверхности основания, разнотолщинность покрытия, шероховатость поверхности покрытия.

Внешний вид мер толщины покрытий представлен на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Имитаторы толщины покрытия



Рис. 2. Меры толщины покрытий натурные

Во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» проводят испытания в целях утверждения типа, поверку и калибровку мер толщины покрытий. Для выполнения данных работ используют следующие рабочие эталоны, передача единицы длины к которым осуществляется от Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 [3]:

1. Государственный рабочий эталон 1 разряда единицы длины в диапазоне 10^{-6} –1100 мм [4] с метрологическими характеристиками:

- диапазон измерений..... (10^{-6} -1100) мм;
 - дискретность отсчета..... 0,001 мкм;
 - доверительные границы абсолютных погрешностей при доверительной вероятности 0,99..... $\pm(0,05+0,5L)$ мкм,
- где L - измеряемая длина в м.

2. Государственный рабочий эталон 2 разряда единицы длины в области измерений параметров шероховатости: $R_{\max}$, R_z в диапазоне от 0,01 до 250 мкм и R_a в диапазоне от 0,01 до 150 мкм с метрологическими характеристиками:

- диапазон измерений параметра шероховатости R_a(0,01 – 150) мкм;

- диапазон измерений параметра шероховатости $R_{\max}$, R_z (0,01 – 250) мкм;
- доверительные границы относительной погрешности при доверительной вероятности 0,95... ± 1 %.

Анализ нормативных документов и справочных материалов [5] показывает, что в качестве покрытий используют более двадцати различных типов металлов. Некоторые из них имеют очень широкое применение (хром, цинк, медь, никель), часть из них - очень узкое специальное применение (родий, рутений, молибден). Кроме того, применяется более тридцати типов сплавов (никель-кобальт, серебро-медь, олово-висмут), порядка десяти конверсионных материалов (неметаллические неорганические) – окислы, фосфаты, около двадцати типов композиционных материалов.

Большое количество применяемых толщиномеров метрологически не обеспечены, например, толщиномеры, которые измеряют двухслойные гальванические покрытия, многослойные покрытия, специальные толщиномеры для измерений покрытий в отверстиях печатных плат и т.д.

Во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» проведены испытания в целях утверждения типа двух типов мер толщины покрытий, более десяти типов толщиномеров, разработаны и утверждены локальные поверочные схемы в области измерений толщины покрытий. Опыт калибровки и поверки мер толщины покрытий показывает, что большое количество мер изготовлены с нарушением технологического процесса и не соответствуют заявленным метрологическим характеристикам. Процесс изготовления мер толщины покрытий можно разделить на три этапа: изготовление оснований, нанесение покрытий, доводка покрытий для обеспечения требуемой толщины, разнотолщинности, шероховатости поверхности. Технологический процесс обработки оснований должен обеспечить стабильность структуры, твердости, электропроводности и магнитных свойств, заданную шероховатость и неплоскостность. Технологический процесс нанесения покрытий должен обеспечивать равномерность по толщине, однородность структуры и физико-механических свойств. При калибровке и поверке мер толщины покрытий не контролируются такие параметры как пористость, микротвердость поверхности, удельная электрическая проводимость, относительная магнитная проницаемость, которые оказывают непосредственное влияние на результаты измерений [6].

В целях обеспечения требуемых свойств покрытий необходимо осуществлять их контроль, комплексно учитывать ряд механических, геометрических, физических и других параметров.

В Российской Федерации действует Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм [7]. В данном документе передача единицы длины выполняется от установки высшей точности и отсутствует прослеживаемость к ГЭТ 2-2010. Также существующая поверочная схема не охватывает все типы мер толщины покрытий и все толщиномеры по типам и диапазонам измерений. Данный документ требует пересмотра.

Для решения описанных выше проблем, возникающих при передаче единиц величин при калибровке и поверке мер толщины покрытий, необходимо:

- сформулировать требования к покрытиям, характеризующие качество покрытий;
- выполнить нормирование контролируемых параметров;
- разработать нормативную документацию на меры толщины покрытий с нормированием метрологических и иных технических характеристик, с совершенствованием технологических процессов производства и ужесточением контроля на каждом этапе;
- разработать методики калибровки и поверки мер толщины покрытий;
- провести испытания данных типов мер;
- разработать и внедрить систему метрологического контроля физико-химического состава и геометрических параметров покрытий.

В настоящее время во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» совместно с ФГУП «УНИИМ» ведутся работы по созданию многофункционального распределенного эталонного комплекса. В состав данного комплекса будут включены:

- опытный образец эталонной установки для измерений электромагнитных параметров;
- комплекс аппаратуры для измерений поверхностной плотности и массовой доли элементов в покрытиях;
- комплекс аппаратуры для измерений геометрических параметров покрытий;
- комплект мер свойств однослойных покрытий;
- стандартные образцы химического состава, поверхностной плотности и толщины многослойного покрытия.

Основные метрологические характеристики многофункционального распределенного эталонного комплекса приведены в таблице 2.

1	2
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений удельной электрической проводимости основания, %	± 1
Диапазон измерений относительной магнитной проницаемости основания, %	1 - 1000
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений относительной магнитной проницаемости основания, %	± 10

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема неразрушающего контроля покрытий является многоотраслевой и непосредственно определяет качество изделий, срок службы, безопасность и другие эксплуатационные свойства изделий [6].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 9.008-82. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения. Введ. 01.01.1983. М.: Издательство стандартов. – 1990. – 16 с.
- [2] URL: <http://www.fundmetrology.ru>.
- [3] 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. – 2012. – № 6. – С. 3 – 7.
- [4] Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А. Измерения геометрических параметров резьбовых калибров // Измерительная техника. – 2016. – № 2. – С. 24 – 27.
- [5] Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. СПб.: Гуманитка. – 2009. – 904 с.
- [6] Гоголинский К.В., Сясько В.А. Методы и средства контроля механических свойств микро- и нанометровых покрытий и модифицированных приповерхностных слоев // В мире неразрушающего контроля. – 2016. – № 3 (61). – С. 43 – 48.
- [7] Р 50.2.006-2001 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм. Введ. 01.01.2002. М.: Издательство стандартов. – 2001. – 8 с.

ТАБЛИЦА 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭТАЛОННОГО КОМПЛЕКСА

Наименование характеристики	Значение
1	2
Диапазон измерений толщины покрытий, мм	0,01 - 3
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений толщины покрытий, мкм	$\pm 0,1$
Диапазон измерений удельной электрической проводимости покрытия, МСм/м	0,5 - 58
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений удельной электрической проводимости покрытия, %	3 - 10
Диапазон измерений поверхностной плотности покрытия, кг/м ²	$1 \cdot 10^{-4}$ - 1
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений поверхностной плотности покрытия, %	1 - 10
Диапазон измерений массовой доли элементов в покрытиях, %	1 - 100
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений массовой доли элементов в покрытиях, %	1 - 10
Диапазон измерений удельной электрической проводимости основания, МСм/м	0,5 - 58

Комплексные исследования процессов обеспечения качества продукции машиностроительных предприятий и формирование системы нормативных документов для повышения эффективности производства

О. С. Салыкова, Б. Р. Салыков, А. Б. Амандыкова, А. У. Бугубаева, И. В. Иванова

Костанайский государственный
университет имени А. Байтурсынова
Костанай, Республика Казахстан

Аннотация – Повышение качества продукции машиностроительного производства требует необходимого соответствия параметров изделий на всех стадиях изготовления нормативным документам. Такими нормативными документами являются стандарты в области метрологии, технического контроля и других сфер машиностроительного производства. Задача статьи состоит в том, чтобы проанализировать аналогичные документы Российской Федерации и гармонизировать их со стандартами Республики Казахстан.

Ключевые слова – качество продукции, машиностроительное предприятие, нормативная документация, стандарты, метрология, технический контроль, экспертиза, калибровка, поверка, измерения

I. ВВЕДЕНИЕ

Мировое машиностроение является неотъемлемой

частью индустриализации мировой экономики и важнейшей отраслью любого индустриально развитого государства. Важность машиностроения в экономике страны состоит в том, что отрасль производит всевозможное оборудование, машины, станки, приборы, а также товары для населения, и обеспечивает стабильность деятельности агропромышленного комплекса, энергетического и металлургического секторов, транспорта и других ключевых отраслей экономики. Исследования посвящены научно-технической разработке направленной на повышение эффективности работы системы менеджмента качества в машиностроительной отрасли Казахстана. Для этого проводятся комплексные исследования организации работ на отечественных промышленных предприятиях, изучается международный опыт обеспечения качества продукции машиностроительных предприятий.

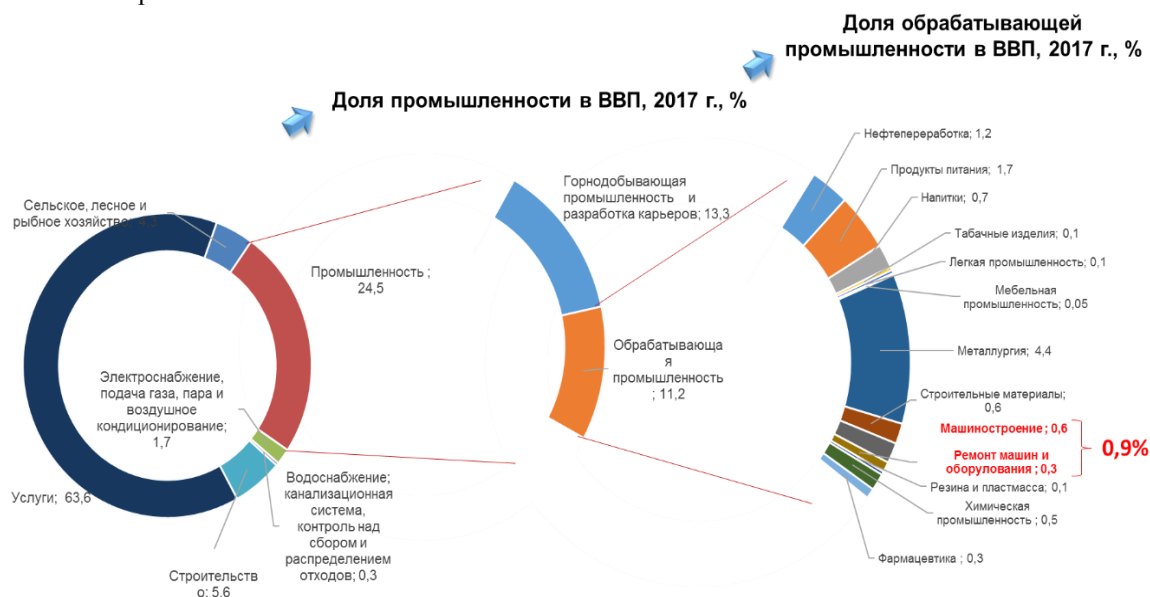


Рис. 1. Структура ВВП, %
Источник: КС МНЭ РК

Актуальность данного исследования обусловлена Государственной Программой индустриально- инновационного развития Республики Казахстан на 2015 – 2019 годы. Согласно данной программе в современных условиях важным инструментом защиты экономической безопасности страны и адекватным способом продвижения отечественных продуктов на рынки является техническое регулирование, которое устанавливает уровень технических требований к технологиям и служит ориентиром для индустрий при выборе технических решений [1].

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В условиях углубления интеграционных процессов в Едином экономическом пространстве и предстоящего вступления Казахстана в ВТО необходимо сконцентрировать внимание на решении ряда существующих проблем:

1. отсутствие должного внимания к стандартизации со стороны отраслевых государственных органов, бизнес-сообществ и промышленности;
2. слабые темпы гармонизации национальных стандартов с международными;
3. отсутствие анализа и прогноза осуществимости инвестиционных проектов, связанных с выпуском конечной продукции;
4. недостаточность испытательных баз и системы сертификационных центров и т.д.

В развитых странах доля машиностроительного производства составляет 30-50% от общего объема промышленной продукции (в Германии – 53,6%, Японии – 51,5%, Англии – 39,6%, Италии – 36,4%, Китае – 35,2%).

Отрасль машиностроения вместе с производством и ремонтом и установкой машин и оборудования составляет 0.9% в общей структуре ВВП. В мировой практике

машиностроение является основным драйвером технологического развития экономики, роста обрабатывающей промышленности и благосостояния населения. Однако, в Республике Казахстан на данный момент пока крупнейшей отраслью обрабатывающей промышленности остается металлургия.

Доля обрабатывающей промышленности в структуре ВВП составляет 11.2% (рисунок 2). Если условно поделить обрабатывающую промышленность на составляющие отрасли по их вкладу в саму структуру обрабатывающей промышленности и технологической сложности, то получается, что само машиностроение без учета сектора «ремонт и установка машин и оборудования» в структуре ВВП составляет 0.6% и относится к категории с высокой технологической сложностью производимой продукции. Согласно мировому индексу технологической сложности, в обрабатывающей промышленности к категории с высокой технологической сложностью относятся 3 сектора – машиностроение, химическая промышленность и фармацевтика. Эти сектора обладают наибольшей добавленной стоимостью и технологической сложностью, а также обладают потенциалом качественного развития, как смежных отраслей, так и всей экономики в целом. В Казахстане данные 3 отрасли занимают в общей структуре ВВП всего 1,4%, что является крайне малым показателем. Стоит отметить, что для качественного роста обрабатывающей промышленности и экономики в целом, стоит развивать именно данные отрасли. Ввиду того, что машиностроение даст наибольший мультипликативный эффект для обеспечения качественного роста всей экономики страны.

Основную же долю в структуре ВВП в рамках обрабатывающей промышленности занимают отрасли с низкой (4,4% от доли ВВП) и средней технологической сложностью (5,5%), которые не приводят к существенному технологическому прогрессу экономики. Вследствие этого, выявляется, что для существенного и качественного роста экономики страны развитые экономики выбрали путь развития отраслей промышленности с высокой технологической сложностью.

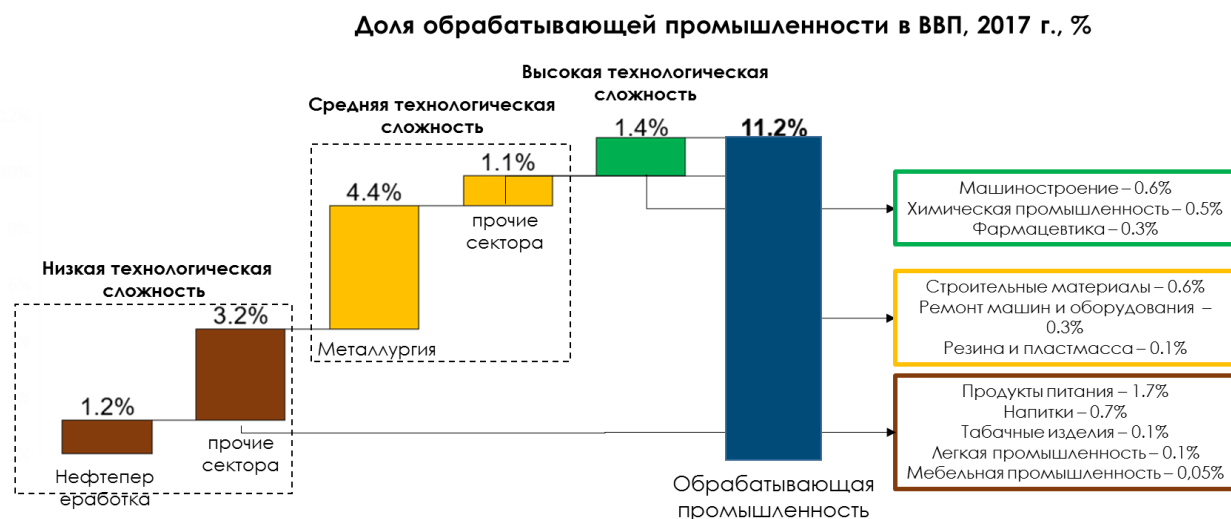


Рис. 2. Структура обрабатывающей промышленности в структуре ВВП
 Источник: КС МНЭ РК

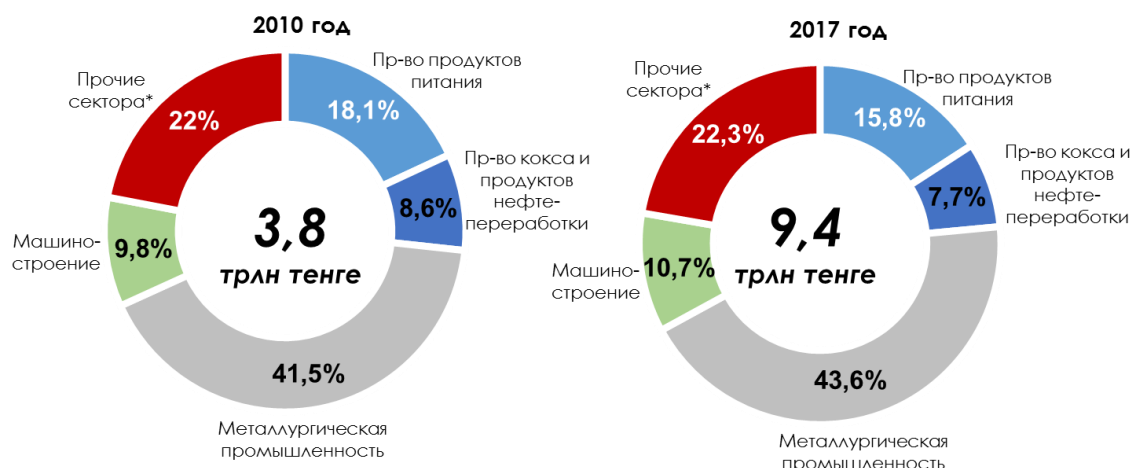


Рис. 3. Структура производства обрабатывающей промышленности
 Источник: КС МНЭ РК

Анализ структуры обрабатывающей промышленности показывает, что за период двух пятилеток индустриализации произошли определенные изменения (рисунок 3). Так, во-первых, наблюдается рост объема производства в самой обрабатывающей промышленности в 2,5 раза, а во-вторых, доля отрасли машиностроения в общей структуре возросла на 0,9 п.п. Стоит также отметить, что доля крупнейшей отрасли обрабатывающей промышленности - металлургической промышленности - также возросла, на 2,1 п.п. Можно сделать вывод, что программа индустриализации оказала более значительное влияние на рост металлургической отрасли, нежели машиностроения. С другой стороны, нельзя не отметить, что машиностроение с соответствующим ростом всей обрабатывающей промышленности не только сумело сохранить долю, но и показало её рост.

На данный момент, драйверами казахстанской обрабатывающей промышленности являются металлургия (43,6% от общего объема производства обрабатывающей промышленности), продукты питания (15,8%), продукция машиностроения (10,7%), кокс и нефтепродукты (7,7%).

Анализ отрасли машиностроения показал (рисунок 4), что рынок машиностроения в Республике Казахстан является достаточно объемным – 13,3 млрд. долл. США в 2017 г. За период с 2010 по 2017 годы объем рынка существенно менялся. В результате, наблюдался постепенный рост с 2010 по 2013 годы с 10,2 до 18,4 млрд. долл. США ввиду улучшения благосостояния населения страны и развития внутренних производств. Затем наблюдается постепенное снижение с 2013 по 2016 год до 9,5 млрд. долл. США. Снижение внутреннего рынка произошло за счёт спада внутреннего производства и сокращения объема импорта. Так, снижение объема производства составило 60,1%, тогда как снижение объема импорта было 48,6%. Внутренний рынок сузился больше из-за спада внутреннего производства, нежели импорта.

Тяжелая макроэкономическая ситуация в регионе повлияла на снижение благосостояния населения, ударила по промышленному производству и вынудила весь региональный рынок сократиться. Многие отечественные предприятия не были готовы к этому, ввиду низкой локализации, моноориентированности сбыта производимой продукции (на закуп, экспорт

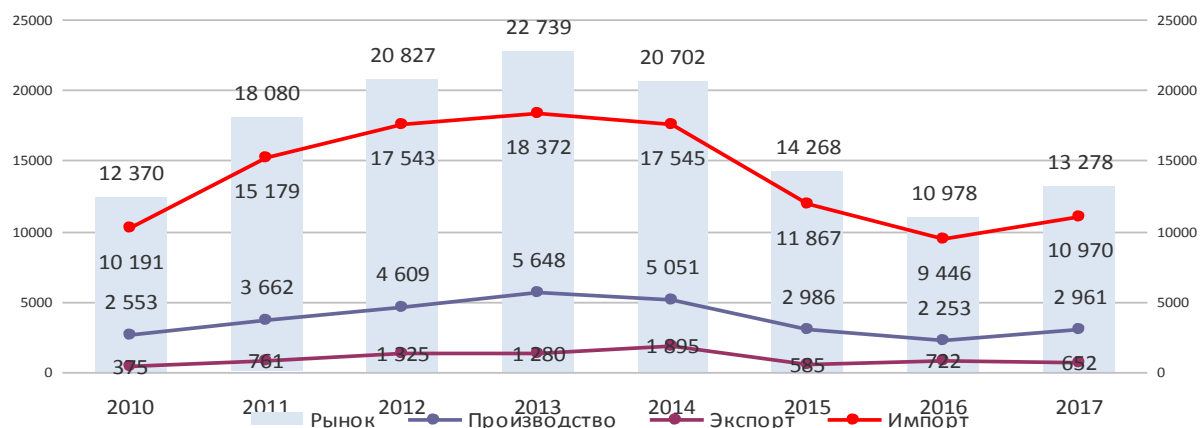


Рис. 4 – Объем рынка машиностроения за 2010-2017 гг.
 Источник: КС МНЭ РК, КГД МФ РК

преимущественно на один рынок России), а также высокой зависимости от государственной поддержки.

Так, только в 2017 году объем внутреннего рынка машиностроения достиг и немного превысил уровень 2010 года.

Стоит отметить, что внутренне производство, в основном, направлено на удовлетворение внутренней потребности страны. Так, за 2017 год отечественное производство покрыло порядка 22.3% рынка машиностроения страны, остальное было замещено импортной продукцией.

Так, по итогам 2017 года объем производства отрасли машиностроения в денежном (долларовом) выражении вырос на 31,4% по сравнению с 2016 годом и достиг отметки 2 961 млн. долл. США (~998.2 млрд. тенге).

Рост объема производства в основном обеспечен за счет увеличения физического объема производства продукции ЖД машиностроения, автотранспортных средств, а также за счет роста продукции электротехнического машиностроения. В 2017 году произошёл восстановительный процесс производства в машиностроении, где до этого периода наблюдался спад.

Отечественный экспорт продукции машиностроения является небольшим по объему в сравнении с объемом производства. На данный момент этот показатель составляет порядка 22% от объема отечественного производства. Однако, стоит отметить, что существенная доля экспорта является товарами реэкспорта, такими как сотовые телефоны, летательные аппараты, морские суда, прочая машиностроительная продукция, не производимая на территории Казахстана.

Основную долю рынка машиностроения в Казахстане занимает импорт. На данный момент объем импорта составляет практически 11 млрд. долл. США, что немногим больше уровня 2010 года. Импорт на внутреннем рынке машиностроения РК занимает 82.6%, в основном это продукция электробытовой техники, средств связи, автотранспортных средств и прочая широкая потребительская номенклатура продукции машиностроения, которая:

1. не имеет аналогов производства внутри страны,
2. производится в недостаточных объемах,
3. не удовлетворяет потребителей по качеству,
4. а также, по которой зарубежные поставщики предложили более выгодные условия поставки, в том числе по цене.

Одной из региональных специализаций Костанайской области на основе исторически сложившейся структуры и реализации ГПФИИР является производство автотранспортных средств и сельскохозяйственной техники [1].

В настоящее время за основу системы менеджмента качества промышленных предприятий Казахстана принят стандарт ISO9000. Аккредитация предприятий на выполнения требованиям этого стандарта позволяет выпускать конкурентоспособную продукцию или оказывать услуги надлежащего качества. Однако

отсутствие нормативной базы для организации работ в отраслях промышленности делает продукцию и услуги гораздо дороже, чем на мировом рынке. Это объясняется недостаточной проработкой тендерных процедур и организационных мероприятий, сложившихся как внутри предприятий, так и между ними и отраженных во многих случаях лишь в договорных документах между хозяйствующими субъектами. К числу таких процедур и мероприятий следует отнести организацию метрологического менеджмента качества, за которой следят метрологические службы предприятий. Систему технического контроля, включающую как входной контроль качества комплектующих изделий, так и контроль качества выпускаемой продукции, которую организует служба технического контроля. Систему качества материально-технического обеспечения производства.

Система стандартов ISO не определяет в деталях процессы обеспечения качества в различных отраслях. Учитывая то, что в машиностроении организация работ на предприятиях близка по кругу решаемых задач, указанные процедуры отвечают одинаковым целям, в промышленно развитых странах создана и активно развивается система отраслевых стандартов. Развитие этой системы тесно связано с организационными мероприятиями, регламентирующими выполнение требований системы менеджмента качества на Государственном уровне. Подготовка таких мероприятий – приказов, определяющих критерии работы и организацию систем качества, нормативных документов в состав которых входят отраслевые стандарты, должна быть научно обоснованной и выполняться с учётом комплекса разнородных требований качества производств.

Проблеме отсутствия нормативно-технической документации в области машиностроения посвящены труды многих авторов:

Развитие научно обоснованной системы менеджмента качества промышленных предприятий, позволяющей повысить эффективность их работы. Разработка комплекса проектов стандартов машиностроительной отрасли для развития системы качества промышленных предприятий.

Программа посвящена реализации одного из приоритетных направлений Государственной Программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015 – 2019 годы и ключевого направления ускорения диверсификации экономики Стратегического плана развития Республики Казахстан до 2020 года - «Машиностроение» [1,2].

Задачами программы являются:

- Сбор информации и анализ функционирования системы менеджмента качества промышленно развитых стран.
- Сбор информации и анализ функционирования системы менеджмента качества, включающей качество выполнения метрологических работ и

работ по техническому контролю на предприятиях машиностроения Российской Федерации.

- Анализ эффективности организации работ по качеству со стороны Государственных органов Российской Федерации.
- Выработка рекомендаций по организации метрологических работ и работ по техническому контролю на предприятиях машиностроения Республики Казахстан.
- Оценка возможностей применения международного опыта по организации технологии «бережливого производства» на предприятиях Республики Казахстан.
- Определение номенклатуры и разработка проектов комплекса стандартов по выполнению метрологических работ и работ по техническому контролю на предприятиях машиностроения.
- Обсуждение проектов стандартов с заинтересованными организациями и их корректировка.

Научная новизна заключается в комплексном подходе на основе разнородных требований к организации работ по повышению качества и уменьшению себестоимости продукции предприятий машиностроения Республики Казахстан. Исследования будут выполняться с учётом мирового, в первую очередь Российского опыта организации системы менеджмента качества. Указанный мировой опыт развития менеджмента качества нарабатывался на базе междисциплинарных научных исследований десятилетиями и является значительным источником повышения эффективности производства. Адаптация его к условиям развития отечественного машиностроения будет также иметь научную основу и междисциплинарный характер.

Практическая значимость результатов программы заключается в научно обоснованной выработке рекомендаций и созданию на их основе комплекса проектов нормативных документов и отраслевых стандартов обеспечения качества машиностроительных предприятий. Проекты документов пройдут обсуждение и будут являться основой и могут быть приняты в качестве отраслевых стандартов в Казахстане

Проблеме отсутствия нормативно-технической документации в области машиностроения посвящены труды многих авторов:

- Пекина С.С., Повышение результативности процесса «внутренний аудит» системы менеджмента качества машиностроительного предприятия;
- Ефимова Г.В., Повышение результативности системы менеджмента качества машиностроительного предприятия;
- Лайкер Джеффри. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира;
- Дэниел Джонс, Джеймс П. Вумек Бережливое производство.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2004 году в Казахстане был принят Закон «О техническом регулировании в РК», который предусматривал реформу в данном стратегическом направлении. Закон предусматривал значительный переходный период, вызванный необходимостью разработки, принятия и внедрения технических регламентов и переход на добровольное использование стандартов. Процесс не был доведён до логического завершения, в стране остаётся дублирование норм, выраженных в различных нормативных актах, которые курируют также различные ведомства. Это ведёт к отсутствию чёткого единого понимания норм производителями и госслужащими, что в свою очередь формирует предпосылки для развития коррупции. В конечном результате казахстанские товаропроизводители проигрывают зарубежным конкурентам.

Также, одним из барьеров на пути развития отечественного машиностроения на сегодняшний день является отсутствие в Казахстане возможности выполнить многие виды сертификационных испытаний на базе собственного сертификационного центра.

В условиях ЕАЭС у участников союза единые технические регламенты и стандарты, многие виды продукции машиностроения нуждаются в сертификации. В настоящее время большинство сертификационных центров на сложную продукцию сосредоточены в России, что делает предприятия Казахстана зависимыми при организации и проведении испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Указ Президента Республики Казахстан от 1 августа 2014 года № 874 «Об утверждении Государственной программы индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015- 2019 годы метрологии. [Электронный ресурс]. – Правовая база. – Режим доступа: <https://online.zakon.kz/Document/> (дата обращения: 3.10.2018).
- [2] Приказ и.о. Министра индустрии и новых технологий Республики Казахстан от 27 декабря 2012 года № 491 «Правила учета и применения международных, региональных стандартов и стандартов иностранных государств, стандартов организаций, классификаторов технико-экономической информации, правил, норм и рекомендаций иностранных государств по стандартизации, подтверждению соответствия и аккредитации на территории Республики Казахстан, за исключением применения их в стандартах организаций». [Электронный ресурс]. – Правовая база. – Режим доступа: http://base.spininform.ru/show_doc.fwx?rgn=59429 (дата обращения: 3.10.2018).
- [3] 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).

Актуальные вопросы разработки и использования методик измерений в приборостроении и машиностроении

Д. Г. Грязин, Т. Н. Сирая

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30
E-mail: tnsiraya@gmail.com

Аннотация — Рассматриваются вопросы применения методик измерений (МИ) в производственных процессах машиностроения и приборостроения. Поскольку массовые технические измерения на производстве выполняются согласно стандартизованным или аттестованным МИ, проводится анализ процедур аттестации МИ. Выделены проблемные вопросы разработки, аттестации и применения МИ в промышленности, в том числе: аттестация МИ с апостериорным оцениванием погрешностей; возможности использования МИ в мягких шкалах и актуализация ранее разработанных МИ. Рассмотрены возможности оперативного контроля погрешностей в рамках МИ и различные варианты оценивания погрешностей измерений согласно МИ.

Ключевые слова — машиностроение; технический контроль; методика контроля; технические измерения; методика измерений; стандартизованная методика; аттестация; погрешность

I. ВВЕДЕНИЕ

Значимость стандартизированной (аттестованной) методики измерений (МИ) для пользователя заключается в том, что в ней четко описана последовательность операций, а также указана оценка погрешности измерения. Поэтому МИ представляет собой законченный метрологический модуль (элемент системы обеспечения единства измерений), который позволяет выполнять измерения и получать результаты требуемого качества (с гарантированными пределами погрешностей). В настоящее время МИ – один из наиболее важных и распространенных метрологических документов.

В современной измерительной практике методики измерений (МИ) играют важную роль, поскольку большинство массовых (так называемых, технических [1]) измерений в производственных процессах машиностроения и приборостроения выполняется согласно стандартизованному или аттестованному МИ. При разработке таких методик регламентирована структура МИ и основное содержание их разделов (см., например, [2, 3]).

В соответствии с базовыми нормативными документами, все МВИ, используемые при испытаниях изделий, должны быть стандартизированы или аттестованы по ГОСТ Р 8.563-2009. Поэтому, с одной стороны, необходимо эффективно применять стандартизированные МВИ, а с другой – актуальны критерии выделения нестандартизованных МВИ, подлежащих аттестации по ГОСТ Р 8.563.

При выборе МИ для включения в методики контроля или в конструкторскую документацию, а также при аттестации нестандартизованных МИ (применительно к их использованию в производственной практике) возникает ряд проблем, обусловленных существенными ограничениями, вводимыми при аттестации МИ согласно ГОСТ Р 8.563. Это, разумеется, сужает область применения МИ на производстве и требует разработки рациональных способов решения практических задач.

Поэтому в настоящем докладе рассматриваются такого рода проблемные вопросы и намечены некоторые пути и способы их решения.

II. ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

Анализ применения МИ в измерительной практике показывает, что в настоящее время выделяются несколько уровней или аспектов определения и применения МИ в системе метрологического обеспечения (СМО) предприятия, в том числе:

– **МИ** как совокупность эмпирических операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение искоемых результатов измерений;

– **МИ** как совокупность методов и средств измерений, условий измерений и алгоритмов обработки данных;

– **МИ** как метрологический документ, регламентирующий требования, правила и нормы выполнения измерения.

Кроме того, рассматривая систему менеджмента качества (СМК) предприятия, следует также выделить дополнительный аспект анализа МИ, а именно:

– **МИ** как документ системы качества, регламентирующий процедуру оценивания (подтверждения) показателей качества изделий (продукции).

Для анализа МИ применительно к промышленной практике далее существенны, прежде всего, два аспекта или уровня понятия МИ:

– **практический аспект: МИ – экспериментальная процедура** использования соединенных между собой и взаимодействующих с объектом СИ определенных типов, направленная на получение результатов измерений;

– **законодательный аспект: МИ – документ**, регламентирующий реализацию измерения на практике.

При анализе эффективности МИ и сопоставлении ряда однородных МИ следует принимать во внимание также:

– **теоретический аспект: МИ – алгоритм** измерения, определяющий основные элементы и порядок выполнения операций.

Кроме того, при анализе использования МИ в рамках СМК следует учитывать также

– **квалиметрический аспект: МИ – процедура** оценивания показателей качества изделий в рамках производственного процесса.

Особенности применения МИ в производственных процессах машиностроения и приборостроения заключаются в следующем:

– МИ входят в состав процедур (методик) контроля, изложенных в различных конструкторских документах на изделия (технических условиях, программах и методиках испытаний, руководствах по эксплуатации, инструкциях по контролю и (или) регулированию);

– предъявляются высокие требования к точности определения параметров изделий при контроле, которые не всегда возможно обеспечить в производственных условиях и за счет использования только традиционных средств и методов измерений;

– необходимо выполнять контроль установленных параметров изделий (продукции), которые не всегда четко определены или могут не являться традиционными физическими величинами.

В настоящем докладе основные вопросы разработки, аттестации и использования МИ рассматриваются с учетом отмеченных выше особенностей указанной области применения МИ.

Прежде всего, одно из наиболее существенных ограничений при аттестации МИ состоит в том, что оценивание погрешностей измерений по МИ выполняется априорно и полученные оценки должны быть указаны в МИ. В то же время, на практике актуальны МИ, допускающие возможность апостериорного оценивания погрешностей.

При анализе возможностей реализации и аттестации этого вида МИ следует рассмотреть несколько вариантов, которые определяются следующими факторами:

- соотношениями составляющих погрешностей;
- параметрами измерительной процедуры (например, числом наблюдений).

Однако, прежде всего, целесообразно изложить основные вопросы, связанные с оцениванием погрешностей измерений при разработке и аттестации МИ.

III. АНАЛИЗ И ОЦЕНИВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И АТТЕСТАЦИИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Наиболее актуальной задачей при разработке и аттестации МИ является оценивание погрешностей результа-

тов измерений, полученных согласно данной МИ. При разработке методики необходимо выявить полный перечень составляющих погрешностей, исследовать их поведение при заданных условиях (в рабочей области измерений) и получить выражения для оценивания характеристик итоговой (суммарной) погрешности результата измерения.

При аттестации конкретной (технической) МИ выполняется априорное оценивание погрешностей для заданного диапазона измеряемых величин и установленных в МИ условий измерений. В этом случае необходимо обеспечить надежные оценки погрешностей, действительные во всей рабочей области измерений. В то же время, нежелательно существенное завышение погрешностей измерений, поскольку это может ограничить возможности применения данной МИ, а иногда – заставит ее корректировать.

При анализе и оценивании погрешностей следует учитывать принятые в нормативных документах (ГОСТ Р 8.563, МИ 1317) варианты задания характеристик погрешностей, включая: нормы погрешностей измерений, приписанные характеристики погрешностей и статистические оценки характеристик погрешностей. Эти варианты различаются по методам получения и способам использования характеристик погрешностей. Так, нормы погрешностей измерений обычно задают в качестве требуемых (допускаемых) при разработке МИ (исходя из требований решаемых практических задач). Они часто применяются при массовых измерениях – в технологических процессах, при испытаниях изделий и контроле продукции.

Так называемые, приписанные характеристики погрешностей определяются как пределы погрешностей, которые гарантированы (с заданной доверительной вероятностью) для любого результата измерения, полученного согласно МИ. Они также широко применяются при технических измерениях. Для их получения используют расчетные или расчетно-экспериментальные методы.

Статистические оценки погрешностей получают на основе экспериментальных данных, полученных при реализации МИ, используя определенные алгоритмы обработки. Обычно такие оценки представляют в виде доверительных интервалов для погрешностей.

Таким образом, во всех вариантах задания характеристик погрешностей ключевыми являются методы оценивания погрешностей. Представление модели измерительной процедуры дает возможность измерения для выявления полного набора составляющих погрешностей. Такой подход полезен тем, что обеспечивает получение полного набора составляющих погрешностей и возможность их непосредственного сопоставления.

В данном случае за основу принята структурная схема измерения (рис. 1), предложенная в работе [4]. На структурной схеме выделены два основных ряда элементов измерения: верхний – ряд материальных элементов, и нижний – ряд модельных элементов. Последний ряд включает модели соответствующих реальных элементов, а также алгоритмы обработки данных.

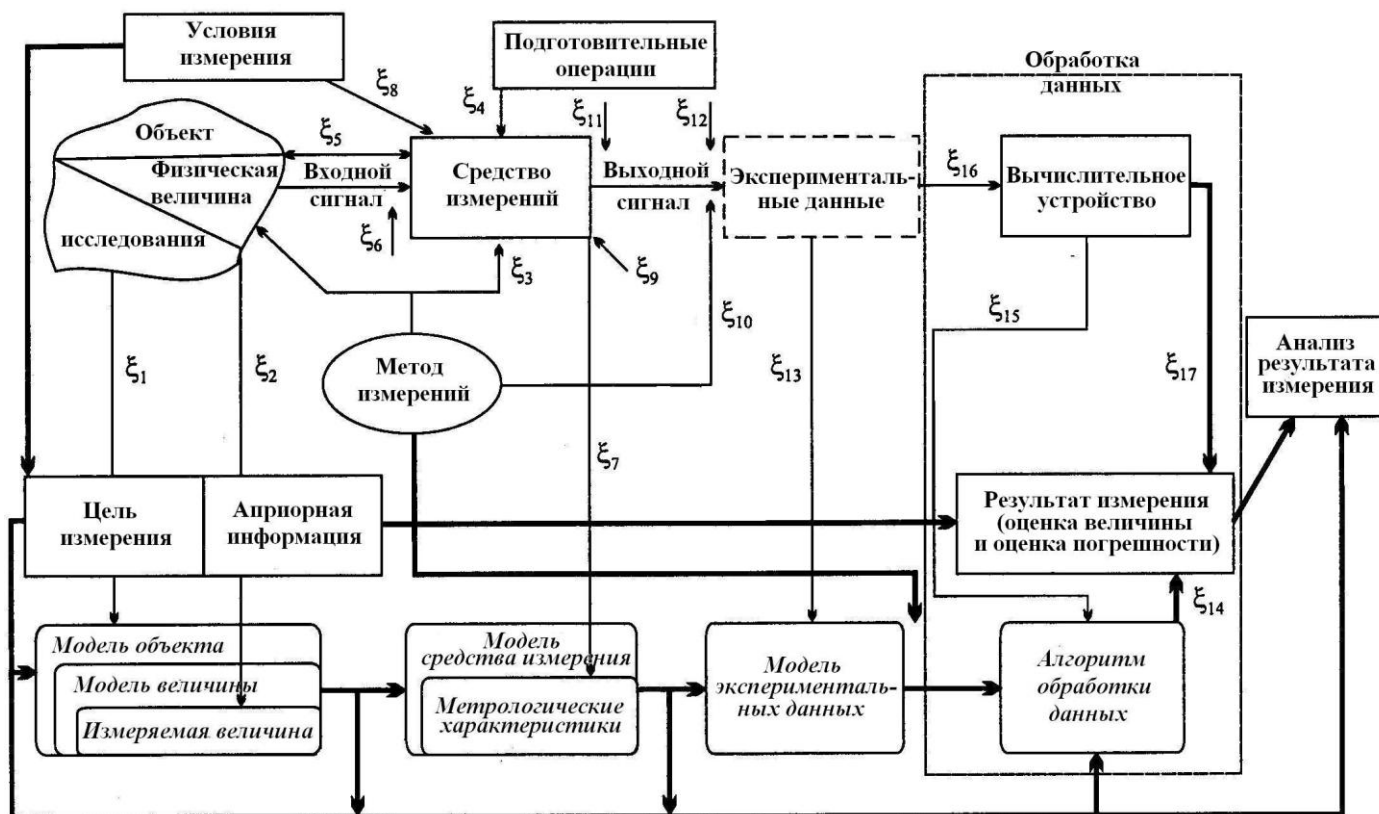


Рис. 1 – Общая схема измерений.

Из приведенной схемы видно, каким образом соответствуют друг другу элементы первого и второго рядов, а также взаимосвязи различного вида модельных элементов. Из этой схемы также видно, что указанные два ряда объединяются на заключительном этапе измерения – при обработке экспериментальных данных, в итоге которой и получается результат измерения и оценки его погрешности.

На указанной схеме также отражены причины (факторы) основных составляющих погрешностей измерений, обусловленных соответствующими элементами измерений или их взаимодействием.

С другой стороны, основные составляющие погрешностей измерений и обуславливающие их факторы перечислены в табл. 1. Таким образом, структурная схема на рис. 1 устанавливает соответствие между элементами измерений (их взаимодействием), факторами и составляющими погрешностей измерений. Этот подход обеспечивает полную выявления составляющих погрешностей и их взаимосвязей. В докладе выделен ряд ситуаций, вызывающих затруднения при аттестации и применении МИ, и для них приведены примеры возможных решений.

IV. АТТЕСТАЦИЯ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ НЕДОСТАТОЧНОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

На практике нередко встречаются ситуации, когда не удается получить априорные оценки погрешностей измерений согласно МИ или они оказываются слишком грубыми и не дают представления о качестве МИ. Однако для решения практических задач (например, при испытаниях аппаратуры) необходимо охарактеризовать качество ис-

пользуемых МИ, и потому приходится применять различные эвристические приемы, чтобы было возможно выполнить аттестацию МИ и дать оценки погрешностей.

Например, можно выделить следующие случаи:

1) Данные (а, следовательно, и результаты измерений и оценки погрешностей измерений) существенно зависят от параметров, и потому общая априорная оценка погрешности по МИ оказывается слишком грубой, а, следовательно, МИ не вполне обеспечивает достоверность контроля.

В этом случае целесообразно выделить несколько характерных для практики поддиапазонов параметров и оценивать погрешности измерений в каждом из них. При этом разбиение должно быть согласовано с целями измерений и обеспечивать реалистические оценки погрешностей (приемлемые для обеспечения контроля) в каждом из них.

2) Аналогично, при разработке и аттестации МИ, предназначенной для использования в широком диапазоне измеряемой величины или в широкой области влияющих величин, бывает целесообразно выделить несколько характерных для практики поддиапазонов (или подобластей) и оценивать погрешности измерений в каждом из них.

В этих случаях необходимо также оформить приложение к Свидетельству об аттестации методики измерений, в котором приводятся метрологические характеристики МИ в соответствии с указанными выше поддиапазонами или подобластями, например, в форме таблицы 2.

3) Априорная информация, необходимая для оценивания погрешностей (например, о характеристиках составляющих погрешностей) недостаточна для оценивания по-

грешностей, априорные оценки являются очень грубыми, а уточненные оценки можно получить лишь апостериорно - в итоге реализации МИ.

ТАБЛИЦА 1. Основные составляющие погрешности измерения

Обозначения	Причины (факторы), обуславливающие погрешности (П)	Наименования составляющих
ξ_1	несовершенство измерительной модели ОИ	пороговое несоответствие модели ОИ
ξ_2	использование «вторичных» величин (при косвенных измерениях)	
ξ_3	неточность установки СИ	установочные П, П горизонтирования
ξ_4	неточность выполнения операций по подготовке СИ к применению	
ξ_5	искажение ФВ ввиду взаимодействия СИ с ОИ	
ξ_6	наличие помех (мешающих воздействий) на входе СИ	
ξ_7	несовершенство свойств СИ, несоответствие МХ реальным свойствам СИ	основные погрешности СИ
ξ_8	реакция СИ на изменения влияющих величин	дополнительные погрешности СИ
ξ_9	инерционность СИ, скорость изменения входного сигнала СИ	динамические погрешности СИ
ξ_{10}	неточность реализации метода измерений	Методические П
ξ_{11}	помехи на выходе СИ	
ξ_{12}	специфика регистрации сигнала или отсчитывания показаний СИ	П регистрации, отсчитывания
ξ_{13}	несовершенство модели экспериментальных данных	
ξ_{14}	несовершенство алгоритма обработки данных	
ξ_{15}	неточность реализации алгоритма обработки с помощью программ	
ξ_{16}	несовершенство процедур передачи и ввода данных	
ξ_{17}	несовершенство вычислительного устройства	

Как отмечено в [2], априорные оценки могут существенно превышать действительные границы погрешностей, и потому не всегда информативны. В этом случае сначала рекомендуется получить предварительные (грубые, недостаточные для обеспечения контроля) оценки погрешностей, а затем уточнить их на этапе опробования МИ.

4) Аналогично предыдущему случаю, если при выборе аттестованной МИ приведенная оценка слегка превышает допустимые пределы, но имеется возможность выполнить многократные наблюдения, то полезно скорректировать (уточнить) эту оценку с помощью апостериорной оценки. При этом, однако, необходимо иметь априорную инфор-

мацию о соотношении случайной и систематической составляющих.

ТАБЛИЦА 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ XX.XX.XX-XXX-2018

Измеряемый параметр	Поддиапазон измерений (влияющих величин)	Предел погрешности измерений по МИ
X	I_{1x}	Δ_{1x}
	I_{2x}	Δ_{2x}
	I_{nx}	Δ_{nx}
Y	I_{1y}	Δ_{1y}
	I_{2y}	Δ_{2y}
	I_{ny}	Δ_{ny}

5) В некоторых случаях можно перейти к использованию относительных показателей погрешностей (например, относительному СКО), и тогда проще получать априорные оценки таких показателей.

V. ВЫБОР МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ И ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ ДАННЫХ В РАМКАХ МЕТОДИК

В промышленной практике МИ используют, прежде всего, в рамках методик контроля качества продукции, которые излагают в соответствующих конструкторских документах. Согласование МИ с содержащим ее конструкторским документом обычно основано на уточнении взаимосвязей задач контроля, поставленных в документе, и измерений, выполняемых согласно МИ.

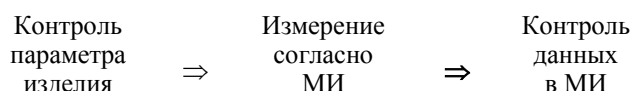
При согласовании МИ с методикой контроля следует также учитывать необходимость контроля точности данных при измерениях, выполняемых в рамках МИ. Таким образом, необходимо обеспечить:

- соответствие **норм** на различных уровнях – в методиках контроля и входящих в них методиках измерений;
- согласованность **методов** – при контроле, при выполнении измерений (согласно МИ) и при контроле качества данных в ходе измерений.

Выявляется явная аналогия методик испытаний и МИ в нескольких аспектах. Например, аналогичны:

- построение (структура) методик испытаний и МИ;
- метрологические требования к методикам испытаний и МИ.

Критерии (методы) контроля данных в МИ должны опираться, с одной стороны, на сведения об их свойствах, и с другой – на приведенные в МИ пределы погрешностей измерений [1, 4]. Поэтому разработка критериев должна выполняться в ходе оценивания погрешностей измерений по МИ. С другой стороны, критерии также связаны с методиками контроля, в рамках которых проводятся измерения по МИ. Таким образом, возникают вложенные задачи:



Указанные задачи должны быть согласованы, в частности, их решение основано на общей метрологической модели задачи контроля характеристик НС. Можно выделить следующие основные группы критериев, полезных для использования в МВИ [4, 5]:

- 1) критерии выделения выбросов в выборках;
- 2) критерии обнаружения систематических сдвигов в данных.

При этом целесообразно использовать непараметрические или устойчивые методы, которые слабо зависят от предположений относительно свойств данных [4].

Таким образом, необходимо оперативно, в ходе измерения выявлять недостоверные данные (результаты наблюдений), которые не соответствуют исходным требованиям по точности и, следовательно, могут приводить к получению итоговых результатов измерений, не удовлетворяющих указанным в МИ требованиям. Если в результате оперативного контроля в соответствии с принятыми критериями выявлены недостоверные результаты наблюдений, то эти результаты следует удалить из массива данных, подвергаемых обработке.

Следовательно, необходимо вводить простые и легко реализуемые методы контроля качества промежуточных данных (например, на основе размаха данных) для того, чтобы в итоге можно было бы подтвердить или гарантировать те оценки погрешностей результатов измерений, которые указаны в МИ.

К сожалению, эти вопросы далеко не всегда достаточно полно отражены в МИ; поэтому при проведении аттестации МИ на них следует обращать особое внимание, поскольку это позволяет оперативно контролировать качество МИ в процессе ее использования.

Следует, однако, учитывать, что оперативный контроль позволяет выявлять и контролировать не все составляющие погрешностей, поэтому они должны далее дополняться и другими методами обеспечения качества измерений согласно МИ.

VI. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ И АТТЕСТАЦИИ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

Во многих случаях в методиках контроля удается использовать ранее разработанные, стандартизованные или аттестованные МИ. Однако это удается не всегда, поскольку использование МИ в методике контроля налагает дополнительные ограничения или требования к МИ. Например, МИ приходится разрабатывать или дорабатывать в случае недостаточной определенности измерительной модели измеряемой величины (ИВ), при недостаточной априорной информации о задаче или при отсутствии средств измерений с требуемыми МХ.

Приведем несколько направлений развития МИ, которые представляются перспективными и могут быть полезны для развития методик контроля параметров современных изделий.

- 1) В качестве примера можно привести один класс методик контроля параметров изделий, который в настоящее время активно разрабатывается в ряде областей. Условно такие методики контроля можно назвать дифференциальными или «основанными на парных сличениях» [6 - 8].

Например, если выполняют контроль рабочего (контролируемого) средства измерений (СИ) с использованием образцового (эталонного) СИ, то выполняют ряд параллельных (одновременных) измерений физической величины (вообще говоря, переменной) с использованием двух указанных СИ, и составляют разности показаний этих СИ:

$$y_i = x_{ip} - x_{io},$$

где x_{ip} – показание контролируемого СИ;

x_{io} – показание образцового СИ.

Далее проводится обработка массива данных $\{y_i, i = 1 \dots n\}$ с целью определения метрологических характеристик (МХ) рабочего СИ и принятия решений о его соответствии установленным требованиям. При этом необходимо использовать информацию об индивидуальных МХ образцового СИ (а не только типовые МХ и нормы на них, указанные в документации).

Такая организация измерений дает возможность получать следующие преимущества при контроле СИ:

- исключить влияние непостоянства ИВ;
- снизить влияние ряда систематических погрешностей;
- снизить требования к МХ образцового СИ.

Отметим, что согласно метрологической классификации, такие измерения могут быть отнесены к «косвенным измерениям, которые приводятся к прямым» [2, 5]. Такие измерения сравнительно мало исследованы в теоретическом плане, но, по-видимому, представляет определенный практический интерес.

Методики контроля, основанные на этом подходе, позволяют обеспечить достоверность контроля даже при сравнительно небольших отношениях норм погрешностей рабочего и образцового СИ (заметно меньших, чем традиционное отношение 3).

- 2) Второе направление связано с разработкой и использованием методик при измерениях в «мягких» шкалах [9]. В настоящее время такие измерения становятся все более востребованными в промышленной практике, и, соответственно, они должны быть обеспечены методиками измерений и процедурами контроля [9].

Более того, для «мягких» шкал МИ даже более значимы, чем для традиционных измерений в «жестких» шкалах. Например, в практике давно применяются шкалы твердости (по Бринеллю, по Виккерсу, по Майеру, по Роквеллу, по Шору), в которых собственно определение величины производится через методику. Иначе говоря, в этом случае конкретная МИ определяет ту или иную шкалу.

Поэтому для измерений в «мягких» шкалах, прежде всего – порядковых, речь идет о рациональном выборе «определяющей» шкалы методики и ее стандартизации на определенном уровне (например, в рамках отрасли).

- 3) Наконец, на практике нередко возникают вопросы о заимствовании МИ из документов (источников) или об актуализации старых МИ (включенных в отмененные или устаревшие документы).

Формально в этих случаях следовало бы проводить повторную аттестацию таких МИ – с учетом новых требований тех документов, в которых их предполагается использовать. Однако часто это довольно трудоемко в организационном плане и может потребовать значительное время. По-видимому, в этом случае основной процедурой должна быть метрологическая экспертиза (МЭ) конструкторской документации, включающей МИ, с тщательным анализом погрешностей по МИ. При этом можно выделить несколько основных случаев.

а) Условия измерений и МХ используемых СИ в «обновленной» МИ хорошо согласуются с теми, которые были указаны в старой МИ, и не появляются новых источников погрешностей. В этом случае, по-видимому, можно ограничиться процедурой МЭ нового документа, содержащего МИ, и считать рациональным использование МИ с теми МХ, которые были для нее указаны ранее.

б) Условия измерений и МХ используемых СИ в новом варианте МИ несколько отличаются от указанных в старой МИ, но имеется информация, позволяющая оценивать новые составляющие погрешностей. В этом случае, по-видимому, можно также выполнять МЭ нового документа, но дополнительно провести оценивание составляющих погрешностей МИ, и далее оценить суммарные погрешности МИ.

В зависимости от полученных результатов и сопоставления их с требованиями к МИ в методиках контроля, можно принимать решение о рациональности использования МИ, причем с уточненными МХ.

в) Наконец, в случае внесения изменений в МИ и при отсутствии достаточно полной информации относительно изменений составляющих погрешностей, по-видимому, придется проводить полномасштабную процедуру аттестации новой МИ.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Стандартизованные и аттестованные методики измерений – основа обеспечения достоверности методик технического контроля в современной промышленности.

2) Весьма ограничительным при разработке и аттестации МИ является условие априорного оценивания погрешности. В то же время, целесообразно в ряде случаев дополнительно использовать возможности апостериорного оценивания погрешностей.

3) С целью обеспечения гарантированного качества результатов измерений (пределов погрешностей, указанных в МИ), необходимо включать в МИ методы контроля качества промежуточных данных, получаемых в ходе измерений.

4) Имеются перспективные направления развития МИ, например, основанные на дифференциальных методах измерений, которые позволяют снизить ряд составляющих погрешностей измерений, а также ослабить требования к образцовым средствам измерений при контроле.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (проект № BR05236539).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Земельман М. А. Метрологические основы технических измерений. – М.: Изд. стандартов, 1991.
- [2] Рабинович С. Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978.
- [3] Лячев В. В., Сирая Т.Н., Довбета Л. И. Фундаментальные основы метрологии. – С.-Петербург, Элмор, 2007 (425 с.)
- [4] Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки данных при измерениях. - Л.: Энергоатомиздат, 1990.
- [5] Тарбеев Ю.В., Александров В.С., Довбета Л.И., Сирая Т.Н. Современные проблемы теоретической метрологии // Итоги науки и техники. Сер. Метрология и измерительная техника. Т.8. - М.: ВИНТИ, 1991.
- [6] Грановский В. А., Кудрявцев М.Д., Унтилов А. А. Испытания курсового канала инс путем сличений: опорный канал с нулевой систематической погрешностью. / Гирокоспия и навигация, т. 25, № 3 (98), 2017.
- [7] Granovskii V. A., Gorokhovskiy K. S. Accuracy proportion of a measuring instrument under calibration and a reference standard having predominant random error. - XXII IMEKO World Congress 2018, Abstracts. – Belfast, 2018.
- [8] Чипулис В. П. Выбор оптимального соотношения погрешностей расходомеров для повышения точности косвенных измерений разности расходов. / Измерительная техника, 2018, № 7.
- [9] Брянский Л. Н., Дойников А. С., Крупин Б. Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. – М.: ВНИИФТРИ. – 2004. – 222 с.

Обоснование уравнения размагничивания корабля

Ю. М. Иванов, В. Г. Семенов

АО «МЕРА»

г. Санкт-Петербург, Россия

mail@mera.spb.ru

Аннотация — Обоснован метод размагничивания корабля как метод минимизации разностей показаний бортовых датчиков и МПЗ и представлены соответствующие уравнения.

Ключевые слова — МПЗ, магнитометр, обмотки с токами, размагничивание корабля

I. ВВЕДЕНИЕ

Размагничивание кораблей (РК) началось во Второй мировой войне как защита от магнитных мин [1]. После войны между специалистами возникали дискуссии по технологии размагничивающих устройств. Например, на Первом симпозиуме по РК в 1946 году англичане, которые устанавливали от 1 до 6 обмоток размагничивания (ОР) на корабль, критиковали немцев за то, что те ставили до 33 ОР на корабль. По мнению англичан, такое обилие ОР говорило о недопонимании немцами проблемы РК [2]. Однако в 70-е годы число ОР на английских противоминных кораблях превышало 30 [3]. Этот пример показывает, как самые актуальные вопросы РК могут превращаться из правильных в неправильные и наоборот. Одному из таких дискуссионных вопросов и посвящена наша статья.

Начиная с 1945 года, в печати появилось много отечественных и зарубежных статей и монографий по РК. Какая-то часть из них приведена в нашем списке литературы. В некоторых публикациях, например, в [8]-[12] обсуждаются те или другие аспекты уравнений (или методов) РК. Однако мы нигде не нашли главного: *обоснования уравнения РК*. Именно это мы попытаемся сделать ниже.

II. УРАВНЕНИЕ РК

На рис. 1 схематически изображен корабль и его система размагничивания. Кружки обозначают трехкомпонентные датчики магнитной индукции (МИ), «а» - одна из точек расположения датчиков. Корабль разделен на p секций, с трехкомпонентной системой ОР каждая и автоматическим регулятором токов ОР (обмотки и регуляторы не изображены, чтобы не затемнять рисунок), q - число

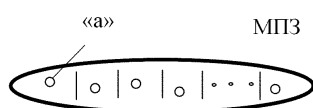


Рис. 1 Схема бортовой системы РК

датчиков, $q \geq p$. Кроме того, корабль снабжен базой данных магнитного поля Земли (МПЗ) для заданного района плавания.

Покажем, что для РК применима модель *погрешности измерения* физической величины

$$\Delta A = A_u - A, \quad (1)$$

где ΔA - погрешность измерения; A_u - результат измерения; A - действительное значение этой величины.

Представим себе силовую линию индукции МПЗ. Она непрерывна. Вдали от корабля она (почти) прямая. С приближением к намагниченному кораблю она искривляется, причем на борту искривление сильнее, чем за бортом. Степень искривления несет информацию о намагниченности корабля.

Показания бортового датчика в каждой точке «а» можно интерпретировать как результаты *измерения МПЗ*, искаженные (иногда очень сильно) влиянием всего корабля на эту точку. Токи ОР подбираются так, чтобы по возможности снизить искажения везде, прежде всего, на борту, поскольку за бортом они снижаются автоматически.

При идеальном РК силовые линии МПЗ должны проходить *сквозь корабль без искажений*. Тогда он становится *прозрачным* для МПЗ и *незаметным* для магнитных мин и средств его обнаружения по магнитному полю.

Запишем по аналогии с (1) соотношение для МИ в системе координат корабля

$$\Delta B_a = (B_a - C_a I) - B_3, \quad (2)$$

где все члены - вектор-столбцы: ΔB_a - погрешность измерения МПЗ в точке «а»; B_a - результат измерения МИ в точке «а»; $C_a I$ - корректирующее действие ОР для снижения погрешности ΔB_a ; B_3 - однородное МПЗ (одно и тоже для всех точек); $C_a = (\hat{C}_1 \ \hat{C}_2 \ \dots \ \hat{C}_1 \ \dots \ \hat{C}_p)_a$ - прямоугольная матрица $(3 \times p)$ постоянных по МИ всех p -секций в точке «а»; $\hat{C}_1 = (C_x \ C_y \ C_z)_1^T$, T - символ транспонирования; I - матрица-столбец $(p \times 1)$ токов всех p -секций.

Составим систему уравнений аналогичных (2) для всех точек $a = 1, 2, \dots, p$. Решение этой системы относительно токов, снижающих погрешности наилучшим образом по методу наименьших квадратов, имеет вид

$$I = (C^T C + \alpha E)^{-1} C^T (\tilde{B}_a - \tilde{B}_3), \quad (3)$$

[12] John J. Holmes. Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. Morgan and Claypool Publishers. 2008. 67 Ps. Снижение проходных характеристик корабля по магнитному полю.

где I – матрица $(p \times 1)$ искомых токов; C – матрица $(3q \times p)$ постоянных по МИ ОР; C^T – матрица C транспонированная $(p \times 3q)$; α – параметр регуляризации; E – единичная матрица $(p \times p)$; $\tilde{B}_a - \tilde{B}_3$ – матрица $(3q \times 1)$.

Как следует из (3), для правильного определения токов ОР требуются оба типа векторов МИ одновременно: B_a и B_3 . Однако, в публикациях, где затрагиваются уравнения РК, неизменно используется только один из них. Так, например, в [8] использован тип B_a (датчик расположен на вершине мачты), в [9] – B_3 (от бортовой геомагнитной базы данных). В [10] – также B_3 . В монографии [12] приводится уравнение, похожее на (3), но с одним типом B_a .

В работе [11] приводятся показатели эффективности различных методов РК. Однако, показатели вызывают сомнения, поскольку сами методы РК лишены должного обоснования. В этой связи, предлагаемый метод (3) должен повысить качество соответствующих показателей эффективности.

Отметим также, что с помощью (2) можно отслеживать эффективность *каждой секции* ОР в работе, либо в настройке с выбором *мест* расположения датчиков и требуемого их *числа*.

III. Выводы

- Достаточно строго обоснован метод РК как метод минимизации разностей показаний бортовых датчиков МИ и МПЗ по уравнениям (2), (3).
- Уравнение (3) остается справедливым и при измерениях за бортом, например, на контрольном стенде, где настройка ОР осуществляется также по *разностям* показаний измерительных и компенсационного датчиков, а показания последнего приближаются к МПЗ с удалением от корабля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] И.Н.Терехов. Дегауссинг и девиация компасов. М. Морской транспорт. 1945. 104 с.
- [2] В.Г.Семенов. Две истории размагничивания кораблей. ООО «Диалог» СПб. 2008. 74 с.
- [3] A Review of Degaussing Systems and DG Measurement Ranges. Maritime Defence. December 1979. v.4 #12 P.494.
- [4] А.П.Латышев. Теория размагничивания. Ч.1. ВМА 1960г. 181 с.
- [5] В.Т.Гузев. Теория размагничивания. Ч.1. ЛКИ. 1977г. 111 с.
- [6] Н.Д.Богачева. Физика и технология размагничивания. Механообр. 1997. 142 с.
- [7] Н.Д.Богачева. Применение размагничивания в технике. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. 264 с.
- [8] Degaussing equipment for surface ships. International Defense Review, 1979, V.12, #3, P.433. Аппаратура для размагничивания надводных кораблей.
- [9] New on-board degaussing system for ships. Maritime Defence. 1990. V.15 #1. P.21. Новая система автоматического РК.
- [10] В.А. Могучий и др. Совершенствование элементов системы компенсации магнитного поля корабля. Морская радиоэлектроника №3, 2002. С.50-54.
- [11] Ю.Г.Брядов и др. Анализ эффективности различных методов размагничивания маломагнитных кораблей – ЦНИИ им. акад.А.Н.Крылова, 2002, вып.13 (297), С.6-8.

ИСПЫТАНИЯ

Особенности метрологического обеспечения испытаний опытных образцов изделий

А. А. Ложечник
АО «СПМБМ «Малахит»
г. Санкт-Петербург, Россия

Н. Н. Скориантов
НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация – В докладе представлены основные аспекты метрологического обеспечения испытаний опытных образцов изделий. Представлены основные этапы работ, связанные с необходимостью создания, метрологической аттестации и внедрения новых методик измерений для обеспечения испытаний образцов изделий.

Ключевые слова — метрологическое обеспечение; этапы жизненного цикла образцов ВТ; метрологическая экспертиза; средства измерений

I. ВВЕДЕНИЕ

Современная ситуация на мировой экономической и политической арене требуют от отечественной экономики инноваций и повышения качества продукции. В частности, страна нуждается в современном высокоэффективном и безотказном вооружении. Для достижения этой цели в Российской Федерации идёт постоянное и широкомасштабное переоснащение и развитие военной техники. Одним из ключевых моментов этой работы является поддержание высокого качества изделий в совокупности со снижением затрат на производство. Метрологическое обеспечение (в том числе метрологическое обеспечение испытаний продукции) является одной из основ обеспечения качества.

Метрологическое обеспечение – это установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. [1] Метрологическое обеспечение осуществляется в соответствии с требованиями, установленными стандартами Государственной системы обеспечения единства измерений (ГСИ) и другими обязательными к применению нормативно-техническими документами [2].

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Метрологическое обеспечение в целом включает в себя: выбор и обоснование состава измеряемых (контролируемых) параметров и характеристик изделий при изготовлении, испытаниях и эксплуатации, допускаемых отклонений этих параметров; обеспечение аттестованными методиками измерений на различных этапах жизненного цикла согласно ГОСТ РВ 15.000-2004 (в частности, это относится к обеспечению технологических процессов - применение методик должны гарантировать заданную погрешность измерений); обеспечение нужд производства оборудованием для мониторинга и измерений (стандартными и нестандартными средства-

ми измерений, а также требуемым испытательным оборудованием) с последующим его метрологическим обслуживанием; обеспечение необходимых условий для выполнения измерений; проведение метрологической экспертизы (или контроля) конструкторской и технологической документации; подготовку высокоспециализированных кадров технологических и метрологических служб в части контрольно-измерительных мероприятий, выполняемых в рамках метрологического обеспечения производства.

Непосредственно перед проведением любых видов испытаний, сотрудниками метрологических служб производится колоссальная работа с целью получения максимально достоверных результатов измерений.

Первоначальным этапом производится метрологическая экспертиза технического (тактико-технического) задания с задачей оценки тактико-технических параметров и характеристик изделия, требуемых физико-технических параметров составных частей изделия с нормированием их величин, допускаемых отклонений на них и погрешности их измерений (или достоверности контроля).

Следующим этапом выполнения работ является:

- определение и обоснование перечня параметров, подлежащих контролю в процессе испытаний;
- выбор и обоснование методов измерений и средств измерений параметров, обеспечивающих требования ТТЗ (ТТТ) [3];
- анализ обеспечения метрологической связи контролируемых параметров изделия и его составных частей (по точности измерений) в процессе испытаний с выбранным оборудованием для мониторинга и измерений (построение метрологических цепей).

Далее следует определение необходимости создания, метрологической аттестации и внедрения новых методик измерений для обеспечения испытаний, средств измерений и испытательного оборудования с требуемой точностью, и разработка необходимых программ и методик испытаний (в соответствии с видами выполняемых испытаний) изделия ВВТ и его составных частей, а также метрологическая экспертиза программ и методик испытаний.

В дополнение к этому необходимо произвести анализ существующего парка оборудования для мониторинга и измерений на базе предприятия (средства измерений, испытательное оборудование, эталоны и др. со-

гласно ГОСТ РВ 0015-002-2012) с целью проверки готовности метрологического обеспечения к проведению испытаний, нормативной базы по вопросам метрологического обеспечения испытаний ВВТ.

Непосредственно в период проведения испытаний специалисты метрологи могут быть задействованы в процессах использования и обслуживания средств измерений и испытательного оборудования, определения фактических значений параметров изделия, оценки соответствия полученных значений заданным с учётом допускаемых погрешностей измерений.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение целесообразно отметить, что перед проведением испытаний образцов изделий необходимо акцентировать внимание на организации и качестве метрологического обеспечения, которое необходимо на всех этапах жизненного цикла изделия. Необходимо правильно определить перечень контролируемых параметров изделия, методов и средств испытаний, содержать современный парк оборудования для мониторинга измерений, непосредственно произвести измерения и выполнить качественный анализ полученных результатов. Все вышеперечисленные факторы в той или иной степени влияют на качество образцов изделий, которое, в свою очередь оказывает решающее воздействие на эффективность их практического применения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] РД 153-34.0-11.203-2001: Методические указания. Информационно-измерительные системы. Анализ состояния метрологического обеспечения в электроэнергетике. Организация и порядок проведения
- [2] ГОСТ Р 8.000-2015 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения
- [3] ГОСТ РВ 1.1-96 ГСС. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения

Обеспечение требуемой достоверности результатов метрологических испытаний

Э. И. Цветков, Е. С. Сулоева

кафедра информационно-измерительных систем и технологий
Санкт-Петербургский государственный университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)
г. Санкт-Петербург, Россия
er-cvetkov@mail.ru, suloeva@list.ru

Аннотация — Представлены теоретические основы анализа достоверности результатов метрологических испытаний при аттестации и верификации средств измерений. Применительно к аттестации достоверность выражается характеристиками ошибок формируемых оценок, а при верификации – либо вероятностью принадлежности оцениваемой характеристики установленному интервалу, либо вероятностью ошибки первого (второго) рода. Получены зависимости характеристик достоверности от характеристик используемых эталонов, а также объема выборки. Даны иллюстративные примеры.

Ключевые слова — достоверность; верификация, метрологический анализ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Основной метод метрологических испытаний предполагает сравнение результатов, получаемых с помощью испытываемых средств с величинами, формируемыми эталонами. Соответственно такие испытания проводятся с использованием испытываемых измерительных средств, а также соответствующих эталонов, точность которых обычно выше точности объектов метрологического анализа. Вообще-то принципиальное отличие эталона от испытываемого объекта в том, что его метрологические характеристики устанавливаются до проведения метрологических испытаний и используются как априорные знания. Эталонные измерительные средства высшего уровня (международные, национальные) создаются на основе текущих достижений науки и техники. Соотношение между точностью используемого при проведении метрологических испытаний эталонного средства и точностью испытываемого средства определяет достоверность результатов метрологических испытаний. В нормативных документах, относящихся к порядку выполнения метрологического анализа, часто устанавливается соотношение 3-5, т.е. требуется, чтобы точность эталонного средства превышала точность объекта метрологического анализа в три – пять раз. Это эвристически установленное требование нельзя признать корректным, во-первых, в связи с тем, что разные характеристики одного и того же средства представляют разные свойства точности: математическое ожидание погрешности – мера постоянной составляющей, а дисперсия – случайной. Более того, если для пары “испытываемое средство – эталон”, отношение средних квадратических погрешностей s , то отношение дисперсий – s^2 . Следовательно, если для СКО рекомендуемое отношение $c/s_3 = 5$ (c_3 – СКО погрешности результатов, формируемых эталонным сред-

ством), то для дисперсий – 25. Иначе говоря, установление требований к отношению характеристик погрешностей результатов, формируемых испытываемым средством, к характеристикам погрешностей результатов, формируемых эталонным средством, должно опираться на априорные знания и требования, устанавливаемые на этапе нормирования метрологических характеристик. На этапе аттестации измерительного средства в качестве требования целесообразно использовать характеристики ошибки оценивания вероятностной характеристики погрешностей результатов измерений, формируемых испытываемым средством, на этапе верификации измерительного средства – вероятность принадлежности оцениваемой характеристики к установленному интервалу или вероятность ошибки первого рода, или вероятность ошибки второго рода.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В [1] и [2] представлено два метода организации метрологических испытаний с использованием эталонов: с помощью эталонного средства измерений; с помощью эталонного средства воспроизведения значения величины.

Обе рассмотренные процедуры экспериментального определения погрешностей позволяют оценивать полные погрешности, включающие в себя как методические, так и инструментальные составляющие.

Оценивание вероятностных характеристик погрешностей производится с использованием массива $\{\Delta^* \lambda_j^*\}_{j=1}^N$ оценок погрешностей в виде выборочного среднего

$$\Theta^*[\Delta \lambda_j^*] = \sum_{j=1}^N g[\Delta \lambda_j^*] / N. \quad (1)$$

Достоверность результатов метрологического эксперимента определяется ошибкой

$$\delta \Theta^*[\Delta \lambda_j^*] = \Theta^*[\Delta \lambda_j^*] - \Theta[\Delta \lambda_j^*], \quad (2)$$

которая включает в себя [1], [2] четыре компонента $\delta_{\text{на}} \Theta^*[\Delta \lambda_j^*]$ – ошибка из-за неадекватности априорных знаний, $\delta_{\text{кв}} \Theta^*[\Delta \lambda_j^*]$ – ошибка из-за конечности объема выборки, $\delta_{\text{от}} \Theta^*[\Delta \lambda_j^*]$ – ошибка из-за отличия действительного значения от истинного, $\delta_{\text{ни}} \Theta^*[\Delta \lambda_j^*]$ – ошибка из-за неидеальности выполняемых операций.

Поскольку оценка $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ случайная величина, представляемая средним (1), при $N \gg 1$ плотность распределения вероятности оценки $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ и, следовательно, $\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ могут быть аппроксимированы нормальными законами:

$$w(\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]) = \left(\sqrt{2\pi} (D[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2} \right)^{-1} * \exp \left(-(\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] - M[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^2 / 2D[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] \right) \quad (3)$$

и

$$w(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]) = \left(\sqrt{2\pi} (\delta D[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2} \right)^{-1} * \exp \left(-(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] - M[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^2 / 2\delta D[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] \right) \quad (4)$$

Соответственно математическое ожидание и дисперсия оценки $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ равны

$$M[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] = \Theta^*[\Delta\lambda_j^*] + \delta_{на} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*] + M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + M[\delta_{ни} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] \quad (5)$$

и

$$D[\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] = D[\delta_{хв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{ни} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] \quad (6)$$

Анализ компонентов полной ошибки показывает, что неадекватность используемых моделей проявляется лишь при применении результатов, полученных с помощью метрологического эксперимента, для отличающихся от имевших место при его проведении входного воздействия и внешних условий. Например, проводя метрологические испытания с использованием постоянного на интервале измерений входного воздействия ($\gamma_j(t) = \gamma_j$), использовать результаты метрологического анализа, полученные для входных воздействий, меняющихся в пределах интервала измерений, нельзя. Влияние неидеальности выполняемых при формировании оценки $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ преобразований также может быть сделано пренебрежимо малым. Следовательно, при устранении ошибок из-за неадекватности используемых моделей и неидеальности преобразований полная ошибка равна

$$\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] = \delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*] + \delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \quad (7)$$

Соответственно, имеем:

$$M[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] = M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] \quad (8)$$

и

$$D[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] = D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] \quad (9)$$

Иначе говоря, обеспечение требуемой достоверности результатов эталонных метрологических испытаний достигается управлением двумя компонентами ошибки

$\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ и $\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$. В качестве управляемых параметров выступают N и характеристики эталона $M[\Delta_{\partial} \lambda_j^*]$ и $D[\Delta_{\partial} \lambda_j^*]$, определяющие $\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$.

Поскольку

$$M[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] = 0 \text{ и } D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] = D[g[\Delta\lambda_j^*]]/N \quad (10)$$

для $w(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*])$ получаем:

$$w(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]) = (\sqrt{2\pi} (D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2})^{-1} \exp \left(-(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] - M[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^2 / 2(D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]]) \right) \quad (11)$$

Соответственно интервальная вероятность равна

$$P[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] = \int_{-\delta_n}^{\delta_n} w(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]) d(\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]) = \Phi((\delta_n + M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]]) / (D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2}) - \Phi((M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] - \delta_n) / (D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2}) / 2 \quad (12)$$

при $\delta_n < M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]]$ и

$$P[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] = \Phi((\delta_n + M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]]) / (D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2}) + \Phi((M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] - \delta_n) / (D[\delta_{кв} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]] + D[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]])^{1/2}) / 2 \quad (13)$$

при $\delta_n > M[\delta_{\partial} \Theta^*[\Delta\lambda_j^*]]$.

Требование $P[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] > C$ может быть выполнено при соответствующих сочетаниях объема выборки N и характеристик эталона $M[\Delta_{\partial} \lambda_j^*]$ и $D[\Delta_{\partial} \lambda_j^*]$. Иначе говоря, необходимые m_{∂} , σ_{∂} и N соответствуют решению уравнения

$$P[\delta\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_{\partial}, \sigma_{\partial}, N) = C. \quad (14)$$

Возможные модификации уравнения (14) определяются видом оцениваемой вероятностной характеристики $\Theta[\Delta\lambda_j^*]$ и устанавливаемыми параметрами m_{∂} , σ_{∂} и N .

Именно,

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_\delta, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1}, N = N_1) = C \quad (15)$$

- уравнение, решение которого соответствует пороговому значению m_δ при оценивании $M[\Delta \lambda_j^*]$ и фиксированных σ_δ и N ;

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta, N = N_1) = C \quad (16)$$

- уравнение, решение которого соответствует пороговому значению σ_δ при оценивании $M[\Delta \lambda_j^*]$ и фиксированных m_δ и N ;

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1}, N) = C \quad (17)$$

- уравнение, решение которого соответствует пороговому значению N при оценивании $M[\Delta \lambda_j^*]$ и фиксированных m_δ и σ_δ .

Аналогичные модификации уравнения (14) могут быть сформированы для случаев, когда $\Theta[\Delta \lambda_j^*] = D[\Delta \lambda_j^*]$ и $\Theta[\Delta \lambda_j^*] = P[\Delta \lambda_j^*] \in [-\Delta_1, \Delta_1]$.

Поскольку $w(\delta \Theta^*[\Delta \lambda_j^*])$ при $N \gg 1$ гауссово ($m_{\delta \Theta^*}, \sigma_{\delta \Theta^*}^2$) вышеприведенные уравнения соответственно приводятся к следующему виду:

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]] / (m_\delta, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1},$$

$$N = N_1) = (\Phi[(M_1 + m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] +$$

$$\Phi[(M_1 - m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] / 2 \text{ при } M_1 > m_\delta$$

и

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]] / (m_\delta, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1},$$

$$N = N_1) = (\Phi[(M_1 + m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] -$$

$$\Phi[(M_1 - m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] / 2 \text{ при } M_1 < m_\delta; \quad (18)$$

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]] / (m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta,$$

$$N = N_1) = (\Phi[(M_1 + m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] +$$

$$\Phi[(M_1 - m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] / 2 \text{ при } M_1 > m_\delta$$

и

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]] / (m_\delta, \sigma_\delta =$$

$$= \sigma_{\delta 1}, N = N_1) = (\Phi[(M_1 + m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] -$$

$$\Phi[(M_1 - m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] / 2 \text{ при } M_1 < m_\delta; \quad (19)$$

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]] / (m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1}, N)$$

$$= (\Phi[(M_1 + m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] + \Phi[(M_1 - m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] / 2$$

$$\text{при } M_1 > m_\delta$$

и

$$P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]] / (m_\delta,$$

$$\sigma_\delta = \sigma_{\delta 1}, N = N_1) = (\Phi[(M_1 + m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] -$$

$$\Phi[(M_1 - m_{\delta M^*}) / \sigma_{\delta M^*}] / 2 \text{ при } M_1 < m_\delta; \quad (20)$$

Таким же образом формируются аналоги уравнений при других сочетаниях $m_\delta, \sigma_\delta, N$.

ТАБЛИЦА 1

Вид оцениваемой вероятностной характеристики	$m_{\delta \Theta^*}$	$\sigma_{\delta \Theta^*}^2$
$\Theta[\Delta \lambda_j^*] = M[\Delta \lambda_j^*]$	m_δ	$(\sigma_\delta^2 + \sigma_\Delta^2) / N$
$\Theta[\Delta \lambda_j^*] = D[\Delta \lambda_j^*]$	σ_δ^2	$c \cdot (\sigma_\delta^4 + \sigma_\Delta^4) / N$
$\Theta[\Delta \lambda_j^*] = P[\Delta \lambda_j^* \in [-\Delta_1, \Delta_1]]$	$P_{\Delta+\delta} - P_\Delta$	$(P_{\Delta+\delta} - P_\Delta^2) / N$

Из вышеприведенных соотношений следует, что оцениваемые характеристики, помимо принятого критерия, зависят от значений параметров $m_{\delta \Theta^*}$ и $\sigma_{\delta \Theta^*}^2$, которые в свою очередь определяются характером метрологических испытаний (эталонные, безэталонные, сличения) и видом оцениваемой вероятностной характеристики ($M[\Delta \lambda_j^*]$, $D[\Delta \lambda_j^*]$, $P[\Delta \lambda_j^* \in [-\Delta_1, \Delta_1]]$). В табл. 1. представлены $m_{\delta \Theta^*}$ и $\sigma_{\delta \Theta^*}^2$ при оценивании вероятностных характеристик $M[\Delta \lambda_j^*]$, $D[\Delta \lambda_j^*]$ и $P[\Delta \lambda_j^* \in [-\Delta_1, \Delta_1]]$ при проведении эталонных испытаний. Представленная совокупность соотношений, а также определений параметров в табл.1., позволяют формировать количественные оценки зависимостей $P[\delta \Theta^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_\delta, \sigma_\delta, N)$.

Пример. $\Theta[\Delta \lambda_j^*] = M[\Delta \lambda_j^*]$.

Пусть $m_\Delta = \sigma_\Delta = 1$; $\sigma_\delta = 0,2$; $N = 10$, $M_1 = 0,2$. Соответствующая зависимость $P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]]$ от m_δ при $\sigma_\delta = \sigma_{\delta 1} = 0,2$ и $N = 10$ представлена на рис. 1.

Зависимость $P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta, N = N_1)$ от σ_δ при $m_{\delta 1} = 0,2$ и $N = 10$ представлена на рис. 2.

Зависимость $P[\delta M^*[\Delta \lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]] / (m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1}, N)$ от N при $m_\delta = 0,2$ и $\sigma_\delta = 0,2$ представлена на рис. 3.

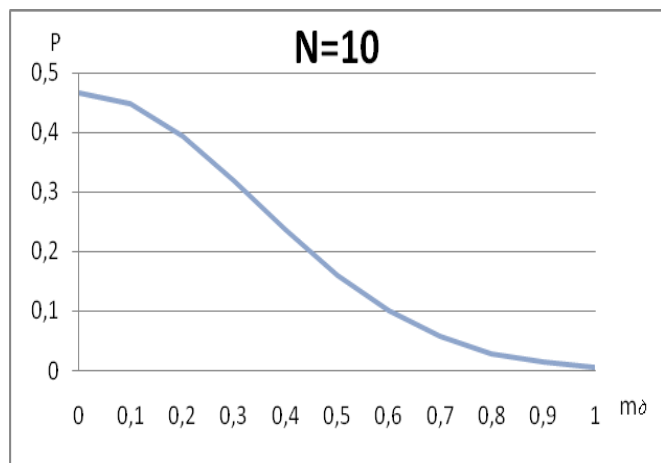


Рис. 1. Зависимость $P[\delta M^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]]$ от m_δ при $\sigma_\delta = \sigma_{\delta 1} = 0,2$ и $N = 10$.

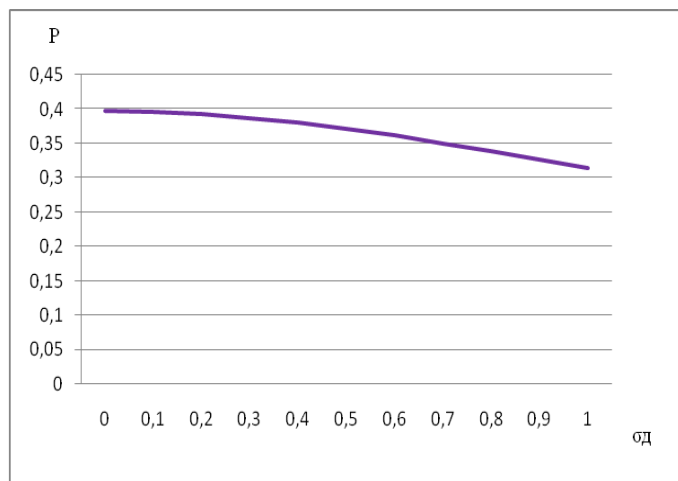


Рис. 2. Зависимость $P[\delta M^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]]$ от m_δ при $\sigma_\delta = 0,2$ и $N = 10$

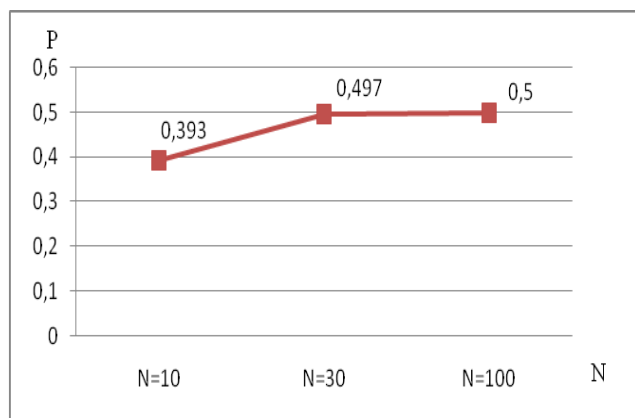


Рис. 3. Зависимость $P[\delta M^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-\delta_n, \delta_n]]/(m_\delta = m_{\delta 1}, \sigma_\delta = \sigma_{\delta 1}, N)$ от N при $m_\delta = 0,2$ и $\sigma_\delta = 0,2$

На рис. 4 представлена зависимость $P[\delta M^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]]$ от двух параметров m_δ и σ_δ для $N=10$.

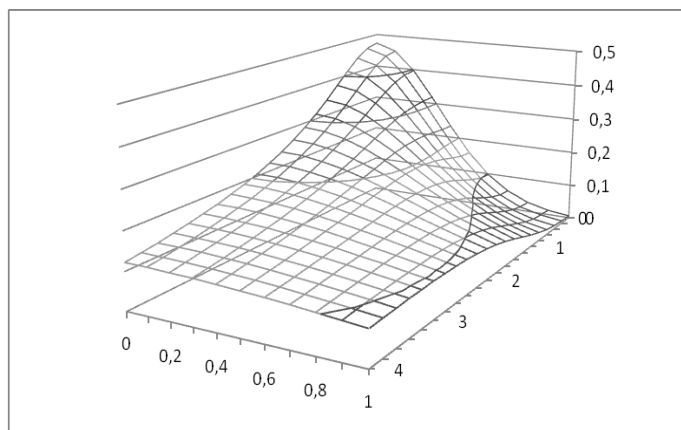


Рис. 4. Зависимость $P[\delta M^*[\Delta\lambda_j^*] \in [-M_1, M_1]]$ от m_δ и σ_δ для $N=10$

Аналогичные зависимости могут быть сформированы для случаев, когда $\Theta[\Delta\lambda_j^*] = D[\Delta\lambda_j^*]$.

Приведенные соотношения характеризуют оценки и свойства ошибок оценок, формируемых при выполнении аттестации измерительного средства. При верификации применяется правило принятия решения о соответствии (ИС_С) или не соответствии (ИС_{НС}) измерительного средства требованиям в соответствии с правилом - $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \in \Theta_C \rightarrow \text{ИС}_C \vee \Theta^*[\Delta\lambda_j^*] \notin \Theta_{НС} \rightarrow \text{ИС}_{НС}$, использующее априори установленную связь между $\Theta[\Delta\lambda_j^*]$ и $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ в виде условной плотности распределения вероятности определяемой вероятностной характеристики $\Theta[\Delta\lambda_j^*]$ - $w(\Theta[\Delta\lambda_j^*]/\Theta^*[\Delta\lambda_j^*])$ или $w(\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]/\Theta[\Delta\lambda_j^*])$. Выше указано, что данное правило предполагает использование одного из трех критериев – требуемая вероятность принадлежности $\Theta[\Delta\lambda_j^*]$ установленному интервалу $P[\Theta[\Delta\lambda_j^*] \in [-\Theta_1, \Theta_2]] = P_{\text{треб}}$, допустимый уровень вероятности ошибки первого рода $P_{I \text{ доп}}$ или допустимый уровень вероятности ошибки второго рода $P_{II \text{ доп}}$. Из (11) следует, что

$$w(\Theta[\Delta\lambda_j^*]/\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]) = \exp(-(\Theta - \Theta^* - m_{\Theta\Theta^*})^2 / 2\sigma_{\Theta\Theta^*}^2) / (2\pi\sigma_{\Theta\Theta^*}^2)^{1/2}, \quad (21)$$

$$w(\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]/\Theta[\Delta\lambda_j^*]) = \exp(-(\Theta^* - \Theta - m_{\Theta\Theta^*})^2 / 2\sigma_{\Theta\Theta^*}^2) / (2\pi\sigma_{\Theta\Theta^*}^2)^{1/2}. \quad (22)$$

Соответствующие пороговые значения $\Theta^*[\Delta\lambda_j^*]$ при установлении $P_{\text{преб}}$ определяются с использованием уравнений (23) – (42):

$$M_{\text{нор}}^* = \text{rad}((\Phi((M_1 + m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}) - \Phi((m_{\text{дм}^*} - M_1)/\sigma_{\text{дм}^*})/2) = P_{\text{преб}}) \quad (23)$$

при $0 < m_{\text{дм}^*}$,

$$M_{\text{нор}}^* = \text{rad}((\Phi((M_1 + m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}) + \Phi((M_1 - m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*})/2) = P_{\text{преб}}) \quad (24)$$

при $0 > m_{\text{дм}^*}$,

$$D_{\text{нор}}^* = \text{rad}((1 - \Phi((m_{\text{дд}^*} - D_1)/\sigma_{\text{дд}^*}))/2 = P_{\text{преб}}) \quad (25)$$

при $0 < m_{\text{дд}^*}$,

$$D_{\text{нор}}^* = \text{rad}(1 + \Phi((D_1 - m_{\text{дд}^*})/\sigma_{\text{дд}^*})/2 = P_{\text{преб}}) \quad (26)$$

при $0 > m_{\text{дд}^*}$,

$$P_{\Delta\text{нор}}^* = \text{rad}((1 + \Phi((m_{\text{дп}^*} - P_1)/\sigma_{\text{дп}^*}))/2 = P_{\text{преб}}) \quad (27)$$

при $0 < m_{\text{дп}^*}$,

$$P_{\Delta\text{нор}}^* = \text{rad}((1 - \Phi((P_1 - m_{\text{дп}^*})/\sigma_{\text{дп}^*}))/2 = P_{\text{преб}}) \quad (28)$$

при $0 > m_{\text{дп}^*}$,

$$M_{\text{нор}}^* = M_1 = \text{rad}((1 - \int_{-M_1}^{M_1} w(M^*/M - 0)dM^*) = P_{I \text{ дон}}), \quad (29)$$

$$M_{\text{нор}}^* = M_1 = \text{rad}((\int_{-M_1}^{M_1} w(M^*/M + 0)dM^*) = P_{II \text{ дон}}). \quad (30)$$

Соответствующие уравнения для определения $M_{\text{нор}}^*$, $D_{\text{нор}}^*$ и $P_{\Delta\text{нор}}^*$ представляются в виде:

$$M_{\text{нор}}^* = \text{rad}(1 - (\Phi((M_{\text{нор}}^* + M_1 + m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}) - \Phi((M_1 + m_{\text{дм}^*} - M_{\text{нор}}^*)/\sigma_{\text{дм}^*}))/2 = P_{I \text{ дон}}) \quad (31)$$

при $M_{\text{нор}}^* > M_1 + m_{\text{дм}^*}$,

$$M_{\text{нор}}^* = \text{rad}(1 - (\Phi((M_{\text{нор}}^* + M_1 + m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}) + \Phi((M_{\text{нор}}^* - M_1 - m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}))/2 = P_{I \text{ дон}}) \quad (32)$$

при $M_{\text{нор}}^* < M_1 + m_{\text{дм}^*}$

$$D_{\text{нор}}^* = \text{rad}(1 - (1 - \Phi((m_{\text{дд}^*} - D_1)/\sigma_{\text{дд}^*}))/2 = P_{I \text{ дон}}) \quad (33)$$

при $0 < m_{\text{дд}^*}$,

$$D_{\text{нор}}^* = \text{rad}(1 - (1 + \Phi((m_{\text{дд}^*} + D_1)/\sigma_{\text{дд}^*}))/2 = P_{I \text{ дон}}) \quad (34)$$

при $0 > m_{\text{дд}^*}$,

$$P_{\Delta\text{нор}}^* = \text{rad}(1 - (1 + \Phi((m_{\text{дп}^*})/\sigma_{\text{дп}^*}))/2 = P_{I \text{ дон}}) \quad (35)$$

при $0 < m_{\text{дп}^*}$

$$P_{\Delta\text{нор}}^* = \text{rad}((1 - \Phi((P_1 + m_{\text{дп}^*})/\sigma_{\text{дп}^*}))/2 = P_{I \text{ дон}}) \quad (36)$$

при $0 > m_{\text{дп}^*}$.

$$M_{\text{нор}}^* = \text{rad}((\Phi((2M_1 + m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}) - \Phi((m_{\text{дм}^*} - M_1)/\sigma_{\text{дм}^*}))/2 = P_{II \text{ дон}}) \quad (37)$$

при $0 < m_{\text{дм}^*}$,

$$M_{\text{нор}}^* = \text{rad}((\Phi((2M_1 - m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}) + \Phi((m_{\text{дм}^*})/\sigma_{\text{дм}^*}))/2 = P_{II \text{ дон}}) \quad (38)$$

при $0 > m_{\text{дм}^*}$,

$$D_{\text{нор}}^* = \text{rad}((1 - \Phi((m_{\text{дд}^*} - D_1)/\sigma_{\text{дд}^*}))/2 = P_{II \text{ дон}}) \quad (39)$$

при $0 < m_{\text{дд}^*}$,

$$D_{\text{нор}}^* = \text{rad}((1 + \Phi((m_{\text{дд}^*} + D_1)/\sigma_{\text{дд}^*}))/2 = P_{II \text{ дон}}) \quad (40)$$

при $0 > m_{\text{дд}^*}$,

$$P_{\Delta\text{нор}}^* = \text{rad}((1 + \Phi((m_{\text{дп}^*})/\sigma_{\text{дп}^*}))/2 = P_{II \text{ дон}}) \quad (41)$$

при $0 < m_{\text{дп}^*}$

$$P_{\Delta\text{нор}}^* = \text{rad}((\Phi((P_1 + m_{\text{дп}^*})/\sigma_{\text{дп}^*}))/2 = P_{II \text{ дон}}) \quad (42)$$

при $0 > m_{\text{дп}^*}$.

Полученные пороговые значения $M_{\text{нор}}^*$, $D_{\text{нор}}^*$ и $P_{\Delta\text{нор}}^*$ (напомним, что $M_{\text{нор}}^*$, $D_{\text{нор}}^*$ и $P_{\Delta\text{нор}}^*$ соответствуют M_1 , D_1 и P_1 , обеспечивающих удовлетворение требования $P_I < P_{I \text{ дон}}$ и $P_{II} < P_{II \text{ дон}}$) составляют основу принятия решения о соответствии (не соответствии) верифицируемого измерительного средства с использованием следующих правил:

$$M^*[\Delta\lambda^*] \leq M_{nop}^* \rightarrow \text{ИС}_+ \vee M^*[\Delta\lambda^*] > M_{nop}^* \rightarrow \text{ИС}_-, \quad (43)$$

$$D^*[\Delta\lambda^*] \leq D_{nop}^* \rightarrow \text{ИС}_+ \vee D^*[\Delta\lambda^*] > D_{nop}^* \rightarrow \text{ИС}_-, \quad (44)$$

$$P_{\Delta}^*[\Delta\lambda^*] > P_{\Delta nop}^* \rightarrow \text{ИС}_+ \vee P_{\Delta}^*[\Delta\lambda^*] \leq P_{\Delta nop}^* \rightarrow \text{ИС}_-. \quad (45)$$

Как и эффективность аттестации эффективность верификации зависит от сочетаний m_{σ} , σ_{σ} , N . Характеристикой эффективности естественно принять пороговое значение оцениваемой характеристики (M_{nop}^* , D_{nop}^* и $P_{\Delta nop}^*$). Иначе говоря, при верификации выбор значений m_{σ} , σ_{σ} , N определяется зависимостями $M_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$, $D_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$ и $P_{\Delta nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$. Используя в качестве основы приведенные выше уравнения получаем следующие выражения для зависимостей $\Theta_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$:

$$M_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_{-M_1}^{M_1} (M / M^*) dM = P_{\text{треб}} \right) \quad (46)$$

- при оценивании математического ожидания и использовании критерия $P [M[\Delta\lambda_j^*] \in [-M_1, M_1] / M^*[\Delta\lambda_j^*]]$;

$$D_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_0^{D_1} w(D / D^*) dD = P_{\text{треб}} \right) \quad (47)$$

- при оценивании дисперсии и использовании критерия $P [D[\Delta\lambda_j^*] \in [0, D_1] / D^*[\Delta\lambda_j^*]]$;

$$P_{\Delta nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_{P_1}^1 w(P_{\Delta} / P_{\Delta}^*) dP_{\Delta} = P_{\text{треб}} \right) \quad (48)$$

- при оценивании вероятности принадлежности и использовании критерия $P [P_{\Delta}[\Delta\lambda_j^*] \in [P_1, 1] / P_{\Delta}^*[\Delta\lambda_j^*]]$.

Использование в качестве критерия вероятности ошибки первого рода (P_I) или вероятности ошибки второго рода (P_{II}) предполагает использование $w(\Theta^*[\Delta\lambda_j^*] / \Theta[\Delta\lambda_j^*])$. Соответствующие зависимости $M_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$, $D_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$ и $P_{\Delta nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N)$ имеют вид:

$$M_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left((1 - \int_{-M_1}^{M_1} w(M^* / M) dM^*) = P_{I \text{ доп}} \right) \quad (49)$$

- при оценивании математического ожидания, использовании критерия P_I и в предположении, что $M[\Delta\lambda_j^*] = M_1 - 0$

$$D_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_0^{D_1} w(D^* / D) dD^* = P_{I \text{ доп}} \right) \quad (50)$$

- при оценивании дисперсии, использовании критерия P_I и в предположении, что $D[\Delta\lambda_j^*] = D_1 - 0$;

$$P_{\Delta nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_{P_1}^1 w(P_{\Delta}^* / P_{\Delta}) dP_{\Delta}^* = P_I \right) \quad (51)$$

- при оценивании вероятности принадлежности, использовании критерия P_I и в предположении, что $P_{\Delta}[\Delta\lambda_j^*] = P_1 + 0$

$$M_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left((1 - \int_{-M_1}^{M_1} w(M^* / M) dM^*) = P_{I \text{ доп}} \right) \quad (52)$$

- при оценивании математического ожидания, использовании критерия P_I и в предположении, что $M[\Delta\lambda_j^*] = M_1 - 0$

$$D_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_0^{D_1} w(D^* / D) dD^* = P_{I \text{ доп}} \right) \quad (53)$$

- при оценивании дисперсии, использовании критерия P_I и в предположении, что $D[\Delta\lambda_j^*] = D_1 - 0$;

$$P_{\Delta nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\int_{P_1}^1 w(P_{\Delta}^* / P_{\Delta}) dP_{\Delta}^* = P_{I \text{ доп}} \right) \quad (54)$$

- при оценивании вероятности принадлежности, использовании критерия P_I и в предположении, что $P_{\Delta}[\Delta\lambda_j^*] = P_1 + 0$.

$$M_{nop}^*(m_{\sigma}, \sigma_{\sigma}, N) = \text{rad} \left(\left(\int_{-M_1}^{M_1} w(M^* / M) dM^* \right) = P_{II \text{ доп}} \right) \quad (55)$$

- при оценивании математического ожидания, использовании критерия P_{II} и в предположении, что $M[\Delta\lambda_j^*] = M_1 + 0$

$$D_{nop}^*(m_\delta, \sigma_\delta, N) = rad \left(\int_0^{D_1} w(D^*/D) dD^* \right) =$$

$$P_{II \text{ доп}}) \quad (56)$$

- при оценивании дисперсии, использовании критерия P_{II} и в предположении, что $D[\Delta\lambda_j^*] = D_1 + 0$;

$$P_{\Delta nop}^*(m_\delta, \sigma_\delta, N) = rad \left(\int_{P_1}^1 w(P_\Delta^*/P_\Delta) dP_\Delta^* \right) =$$

$$P_{II \text{ доп}}) \quad (57)$$

- при оценивании вероятности принадлежности, использовании критерия P_{II} и в предположении, что $P_\Delta[\Delta\lambda_j^*] = P_{II} - 0$.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наличие и использование априорной информации о характеристиках используемых эталонов позволяет определить достоверность результатов метрологических испытаний. Предложенная модель метрологических испытаний позволяет определить сочетания $(m_\delta, \sigma_\delta, N)$, обеспечивающие требования по достоверности получаемых результатов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Цветков Э.И. Основы математической метрологии. изд. "Политехника", СПб, 2005.
- [2] Цветков Э.И. Метрология. Модели, метрологический анализ, метрологический синтез. СПб, Изд. СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2014.

Аттестация испытательного оборудования в метрологическом обеспечении испытаний продукции

Г. С. Слепынский
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
г. Санкт-Петербург, Россия

Н. Н. Скориантов
НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация – в докладе представлены основные этапы аттестации испытательного оборудования. Показаны условия применения аттестованных образцов. Перечислены основные нормативные документы в области аттестации стендов и испытательного оборудования.

Ключевые слова — метрологическое обеспечение; аттестация испытательного оборудования; средства измерений; утверждение типа

I. ВВЕДЕНИЕ

Испытательное оборудование (ИО) – основной инструмент испытателя, используемый при проверках соответствия технических характеристик (ТХ) аппаратуры, приборов, средств измерений (СИ) и других технических средств (ТС) требованиям стандартов или технической документации (ТД) на эти ТС.

Аттестации образцов ИО (в том числе в сфере обороны и безопасности), следует рассматривать как независимые от производителя и собственника ИО проверки соответствия, направленные на подтверждение технических характеристик ИО, заявленных производителем в технической документации на ИО (Руководство по эксплуатации – РЭ, технические условия – ТУ, и др.)

Технические требования к ИО формируются заказчиком на этапе производства ИО в соответствии с требованиями, предъявляемыми к испытываемой продукции.

Технические характеристики ИО определяются производителем ИО и указываются в технической документации ИО.

Стоит отметить, что не все производители отечественного и импортного ИО корректно нормируют и отражают технические характеристики ИО. Данный факт создаёт трудности при выборе ИО, необходимого при проведении испытаний продукции. Более того, некорректное нормирование технических характеристик ИО может привести к ошибочному выбору методов измерений при проведении аттестации.

II. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИО

ИО различных типов применяется, прежде всего, при испытаниях продукции, целью которых является проверка соответствия ТХ образцов испытываемой продукции требованиям, предъявляемым производителем этой продукции.

Важным примером области применения ИО являются исследования опытных образцов продукции в условиях воздействия внешних влияющих факторов (ВВФ). Исследования образцов продукции позволяют выявить недостатки при последующем выпуске продукции.

Кроме того, использование ИО позволяет проверить сохранность ТХ образцов продукции.

III. АТТЕСТАЦИЯ ИО

Любые контрольные испытания (приемо-сдаточные, периодические, сертификационные, исследовательские и др.), выполняемые в сфере государственного регулирования, требуют применения **аттестованных образцов ИО**.

При аттестациях ИО в сфере государственного регулирования для выполнения измерений должны использоваться только **СИ утверждённых типов**.

По аналогии с другими процедурами проверки соответствия, предусмотренными Федеральным законом № 102-ФЗ, например, первичной и периодической поверками СИ, аттестации подлежат как при вводе в эксплуатацию ИО (первичная аттестация), так и в процессе эксплуатации (периодические или повторные аттестации).

Аттестации подлежат только исправные, установленные на постоянное место эксплуатации, подключенные к сетям (электропитание, вода и др.) образцы ИО. Стоит отметить, что в соответствии с ГОСТ Р 8.568-2017 (дата введения 01.08.2018 г.) допускается проводить первичную аттестацию ИО при выпуске из производства непосредственно в производственном помещении производителя или до транспортировки ИО к месту эксплуатации. При этом, согласно примечанию п. 4.3 ГОСТ Р 8.568-2017, производитель обязан предоставить гарантию сохранности определенных при аттестации точностных характеристик ИО. Представляется недопустимым использование данного примечания при аттестации (до транспортировки) ИО. При транспортировке ИО подвергается механическим воздействиям, которые могут привести к некорректной работе составных частей ИО, что повлияет на точность воспроизведения заявленных технических характеристик. Следовательно, сохранность точностных характеристик можно подтвердить только путём их проверки на месте эксплуатации, что и является сутью первичной аттестации ИО.

IV. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ В ОБЛАСТИ АТТЕСТАЦИИ ИО

В настоящее время в РФ действуют два нормативных документа, устанавливающие порядок проведения аттестации ИО:

- ГОСТ 8.568-97. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения (С изменением № 1 от 2001 г.)
- ГОСТ РВ 0008-002-2013. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции.

Отдельные положения, указанных стандартов, представляются неоднозначными.

Например, разделение программ и методик аттестации на два документа.

Представляется целесообразным объединение программы и методик аттестации в один документ. Формирование всех этапов проведения аттестации в виде единого документа не допустит разрыва в последовательности действий при проведении аттестации ИО.

Важнейшим условием качества работ по проведению аттестации ИО является то, что документ *Программа и методики аттестации* должен распространяться только на определённый тип ИО. Однако, указанные стандарты допускают разработку «типового» (универсального) документа. Необходимо отметить, что разработка типового документа *Программа и методики аттестации* может отразиться на качестве работы по проведению аттестации ИО.

Например, типовая программа и методики аттестации климатических камер может распространяться на десятки единиц этого ИО, в том числе ИО с различными характеристиками. Как указано выше, ошибка при нормировании ТХ производителем ИО может повлечь за собой ошибки в выборе методов измерений при аттестации ИО. В случае с большим количеством ИО неточность в выборе методов может отразиться на качестве, выпускаемой продукции в крупных масштабах.

С учетом вышеизложенного представляется необходимым проведение работы по усовершенствованию требований к нормативным документам, регламентирующим требования и порядок проведения аттестации ИО.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федеральный закон № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
- [2] ГОСТ Р 8.568 (с Изменением № 1). ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.
- [3] ГОСТ 16504-81. СГИП. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

Интервальный критерий окончания переходного процесса в измерительной цепи при испытаниях

Ю. С. Бехтин

НИУ «МЭИ»,

г. Москва, Россия

111250, Красноказарменная ул., д. 14
yuri.bekhtin@yandex.ru

А. А. Лупачев

НИУ «МЭИ»,

г. Москва, Россия

111250, Красноказарменная ул., д. 14
LupachevAA@yandex.ru

В. А. Логинов

НИУ «МЭИ»,

г. Москва, Россия

111250, Красноказарменная ул., д. 14

Е. С. Еличева

НИУ «МЭИ»,

г. Москва, Россия

111250, Красноказарменная ул., д. 14
elizabethelicheva@gmail.com

А. Р. Пецинярж

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

г. Москва, Россия

105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
arkasha.pe@yandex.ru

Аннотация — В докладе рассмотрен стандартизованный интервальный критерий окончания переходного процесса, применяемый при различных видах испытаний сложных объектов, например, температурных испытаниях. При этом анализ сигналов в измерительной системе проводится в режиме on-line. Критерий интервального вида использует текущую информацию о допустимом приращении сигнала переходного процесса на заданном интервале наблюдения. Анализ интервального критерия показал наличие ограничения на его применение из-за существенной динамической погрешности определения момента окончания переходного процесса. Это связано с параметрической и структурной неопределённостью измерительной цепи. Параметры критерия обуславливают критическое значение постоянной времени и область его использования.

Ключевые слова — измерительная цепь, динамическое звено первого порядка, интервальные критерии окончания переходного процесса, критическая длительность интервала наблюдения за процессом

1. ВВЕДЕНИЕ

В действующих отечественных и зарубежных стандартах по динамическим испытаниям объектов рекомендуются различные критерии окончания переходного процесса (ПП). Такие объекты имеют различную технологическую основу, например, в судостроении при испытаниях на теплопроводность [1] емкостей из полимерных композиционных материалов для перевозки сжиженного природного газа морем. Такие испытания являются длительными и энергоёмкими.

Задача состоит в определении в режиме on-line момента наступления установившегося значения ПП с требуемой динамической погрешностью [2] Δ_d . Обычно в эмпирических критериях не установлена связь между параметрами переходного процесса и динамической погрешностью измерений. При этом в качестве модели переходного процесса в канонической измерительной цепи (ИЦ) используется динамическое звено первого порядка.

В качестве критериев применяются так называемые критерии интервального вида (КИВ). Суть такого крите-

рия состоит в том, что текущее приращение сигнала ПП на заданном интервале наблюдения сравнивается с допускаемым. В случае получения интервала наблюдения с текущим приращением не более допускаемого полагают, что наступил установившийся режим в ИЦ и ПП считается закончившимся с допускаемой погрешностью. Такой критерий принято обозначать как: «1К/1час» («1K/1hour»), если допускаемое приращение температуры Δ_n равно 1 К за интервал наблюдения (ИН) ΔT_n , равный 1 ч.

Параметры современных КИВ приведены в табл. 1. Использование КИВ в области испытаний военной и космической техники показано в работах [3-7].

ТАБЛИЦА 1. Сводная таблица интервальных критериев

№ п/п	Обозначение критерия	Параметры критерия		Источник информации
		Приращение	Интервал наблюдения	
1	«1%/30с»	1 %	≥ 30 с	[7]
2	«2%/1h»	2 %	1 час	[8]
3	«1К/1h»	1 К	1 час	[9]
4	«2К/1h»	2 К	1 час	[10]
5	«1К/5h»	1 К	5 час	[4]
6	«1К/3h»	1 К	3 час	[11], [12]
7	«3К/∞»	3 К	Не определён	[5]

Данная работа посвящена поиску ограничений на применение интервальных критериев определения момента завершения ПП.

На наличие ограничения при использовании КИВ указывается в работе [8], в которой рассматривается процесс нагрева силовых трансформаторов при испытаниях. В этой работе приведены экспериментально определённые абсолютные систематические динамические погрешности определения установившейся температуры при использовании типичного КИВ в широком диапазоне возможных изменений параметра ИЦ. По этим данным можно рассчитать относительные динамические погрешности δ_k первого рода на конец интервала наблюдения $\delta_k(\text{«1К/1h»}) = 82,5\%$ и $\delta_k(\text{«2К/1h»}) = 31,6\%$ в зависимости от тепловой

постоянной времени трансформатора, при полном изменении сигнала ПП равному 60 К.

Исходя из этого в работе [8] отмечается, что существенные систематические динамические погрешности (до десятков процентов) наблюдаются «из-за использования ненадлежащего критерия для определения теплового установившегося режима».

II. КЛАССИФИКАЦИЯ КРИТЕРИЕВ ИНТЕРВАЛЬНОГО ВИДА

Авторам настоящей работы не известны попытки классификации КИВ. Критерий интервального вида использует текущую информацию о сигнале $f(t_k)$ ПП и о приращении сигнала $\Delta f(t_k) = f(t_k) - f(t_n)$ ПП на заданном интервале наблюдения $\Delta T_n = t_k - t_n$, где $f(t_n)$ и $f(t_k)$ - значения физической величины в начале t_n и конце t_k интервала наблюдения.

Для систематизации КИВ можно использовать следующие классификационные признаки:

- по поведению критерия при наличии у ИЦ различных видов неопределённости:
- сигнальной неопределённости: $0 \leq f(t_k) \leq f_{\max}$;
- параметрической неопределённости: $0 \leq \tau \leq \tau_{\max}$;
- структурной неопределённости в виде динамических звеньев [2];
- по форме выражения допускаемого приращения сигнала ПП за интервал наблюдения:
- КИВ-О с относительным приращением: $\rho(t_k) = \Delta f(t_k) / f(t_k) \leq \delta_n = \Delta_n / f_{\max}$;
- КИВ-А с абсолютным приращением: $\Delta f(t_k) \leq \Delta_n$;
- по количеству интервалов наблюдения:
- с одним ИН;
- составной интервал с несколькими соседними;
- по длительности интервалов наблюдения:
- с постоянной длительностью;
- с переменной длительностью:
- ручным переключением;
- с программным переключением;
- с адаптивным переключением.

КИВ нашли применение также в средствах измерений для повышения эффективности их функционирования.

Примером интервального критерия с относительным приращением сигнала ПП служит критерий из стандарта ГОСТ 3484.1-88 [7], реализованный в цифровом измерителе сопротивления «Омметр ВИТОК» [13]. В этом измерительном приборе решение об установившемся показании прибора принимает оператор, когда эти показания изменяются не более чем на $\pm 1\%$ от отсчитанного выходного уровня в течение не менее 30 с. В приборе для испытаний трансформаторов «ПИТ» [14] определение установившейся силы рабочего тока в ИЦ выполняется автома-

тически. При этом процесс измерений силы тока при реализации метода «вольтметра-амперметра» прекращается, если получаемые значения при 30-ти последовательных наблюдениях, выполняемых через 1 с, не отличаются более чем на 1%. Примером КИВ с абсолютным допускаемым приращением сигнала ПП, равным 0,2 К, и с набором переключаемых вручную ИН служат критерии: «0,2К/5с», ..., «0,2К/20с» реализованные в цифровом измерителе температуры «Testo-105» фирмы «Testo AG» [15]. В этом измерительном приборе решение об установившемся показании прибора принимается автоматически в режиме «AutoHold», когда сигнал ПП в измерительной цепи изменяется не более чем на 0,2 К в течение выбранного ИН.

III. КРИТИЧЕСКАЯ ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ИНТЕРВАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ

Природу появления существенных систематических динамических погрешностей первого рода можно проиллюстрировать графически на примере применения КИВ-О со следующими параметрами « $V\%/\Delta T_n$ »: « $1\%/30с$ » [7], где $V\% = 100\delta_n$. На рис. 1 приведены результаты моделирования шести экспоненциальных ПП с различными значениями $\tau_{1...6} = \{6,25; 12,5; 25; 50; 100; 200 с\}$, причём первые три из них меньше ΔT_n . На кривых выделены интервалы наблюдения, удовлетворяющие исследуемому интервальному критерию. Для двух последних кривых при $\tau_5 = 100 с$ и $\tau_6 = 200 с$, критерий даёт ложноположительный результат, не удовлетворяющий требованию по Δ_d [16].

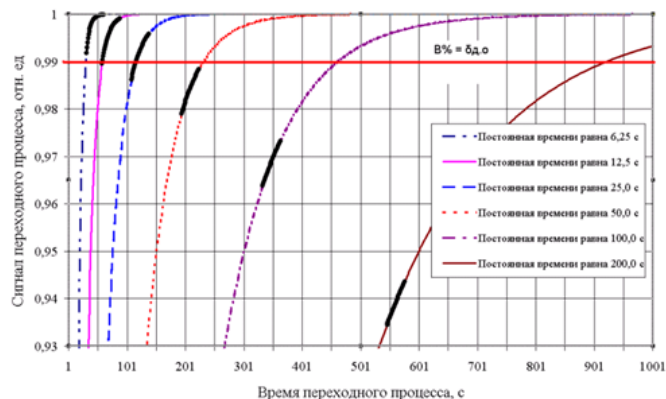


Рис. 1. Положение интервала наблюдения на кривых переходного процесса с различными постоянными времени

Расположение ИН вне зоны допускаемых динамических погрешностей иллюстрирует тот факт, что выполнение условий КИВ не гарантирует достижения на этом интервале сигналом ПП установившегося значения с требуемой по умолчанию погрешностью δ_d . Как видно из рис. 1, уже для $\tau \geq 50$ с искомый интервал наблюдения длительностью 30 с лежит вне точностного допуска 1%.

В результате моделирования обнаружено наличие у КИВ критического значения постоянной времени (КЗПВ) $\tau_{кр}$ [16], которое ограничивает область применения всех известных интервальных критериев, как КИВ-О, так и КИВ-А. Причём ИЦ может быть представлена моделями динамических звеньев от первого до третьего порядков.

Для модели ИЦ первого порядка $\tau_{кр}$ можно определить аналитически и графически. Аналитическое решение было найдено:

- через ошибку в нахождении момента наступления установившегося значения в работе [17];

- через экстремум квадратичного функционала отклонения динамической погрешности на конец интервала наблюдения от допускаемого уровня для наступления установившегося значения в работе [18].

При этом критическое значение постоянной времени следует рассчитывать по (1) [17,18], при $\delta_H = \delta_d$ и $f(t) = f_{MAX}$:

$$\tau_{кр1} = \Delta T_H / \ln [2/(1 + \delta_H)]. \quad (1)$$

Графический способ определения КЗПВ опирается на диаграмму изменений ПП для предельного случая, представленного на рис. 2.

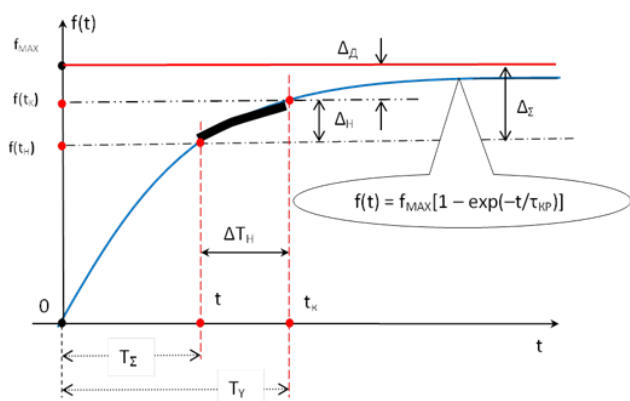


Рис. 2. Положение интервала наблюдения на кривой переходного процесса в предельном случае

Критическая постоянная времени $\tau_{кр}$ критерия интервального вида « $\Delta_H; \Delta T_H$ » численно равна постоянной времени динамического звена первого порядка, для ПП которого определены два интервала T_Υ и T_Σ . Длительность первого интервала T_Υ определяется динамической погрешностью $\delta_d = \Delta_d / f_{MAX}$. Длительность второго интервала T_Σ определяется динамической погрешностью $\delta_\Sigma = \delta_d + \delta_H$. Разность длительностей этих интервалов равна длительности интервала наблюдения ΔT_H по критерию:

$$\Delta T_H = \tau_{кр} * \ln (\delta_\Sigma / \delta_d). \quad (2)$$

Допускаемое относительное приращение сигнала ПП при этом равно δ_H по критерию « $\Delta_H; \Delta T_H$ ».

Из (2) получаем оценку (3) критической постоянной времени для графического способа определения КЗПВ:

$$\tau_{кр} = \Delta T_H / \ln (1 + \delta_H / \delta_d). \quad (3)$$

Различия в КЗПВ, определённых аналитическим и графическим способами, т.е. по (1), от (3), в относительной форме можно определить с помощью выражения

$$\Delta \tau_{кр} / \Delta T_H = (\tau_{кр1} - \tau_{кр}) / \Delta T_H = \delta_H / [\ln 2 (\ln 2 - \delta_H)].$$

Для условий: $\delta_H = \delta_d$ и $f(t) = f_{MAX}$, относительное различие КЗПВ определяется на уровне $\approx 2\delta_H$.

Необходимо отметить, что в работах [6,8,11,12] не используется понятие «критической постоянной времени» и отсутствует определение значения критической постоянной времени для интервального критерия, по которому определяется установившееся значение ПП в ИЦ в режиме «on-line».

IV. Выводы

1. Появление существенных систематических динамических погрешностей при параметрической неопределённости ИЦ в интервале $0 \leq \tau \leq \tau_{MAX}$ связано с **ненадлежащим использованием интервального критерия** для определения момента наступления установившегося режима.

2. Применение КИВ для анализа сигнала ПП на выходе ИЦ, представленной моделью динамического звена первого порядка с постоянной времени $\tau > \tau_{кр}$, даёт ложноположительный результат. Факт положительного решения КИВ указывает на достижение допускаемого приращения сигнала на интервале наблюдения. Ложный характер данного решения КИВ скрыт от потребителя измерительной информации и вводит его в заблуждение относительно достигнутой на конец интервала динамической погрешности установления ПП, которая может быть значительно больше чем δ_d .

3. Таким образом, КИВ неправильно используется для значений постоянной времени ИЦ τ вне разрешенного для критерия диапазона $\{0 \dots \tau_{кр}\}$, т.е. при $\tau_{кр} < \tau \leq \tau_{MAX}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Федонюк Н.Н. Применение полимерных композиционных материалов в судостроении. - СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр.» Октябрь 2014. - 22 с.
- [2] Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 224 с.
- [3] J.W. Welch. "Assessment of Thermal Balance Test Criteria Requirements on Test Objectives and Thermal Design." / 46-th International Conference on Environmental Systems, 10-14 July, 2016. Vienna, Austria. - 13 p.
- [4] ГОСТ Р 56469-2015. Аппараты космические автоматические. Термобалансные и термовакуумные испытания. - М.: Стандартинформ, 2015. - 12 с.
- [5] ГОСТ 30630.0.0-99. Методы испытаний на стойкость к внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Общие требования. - М.: ИПК Стандартов, 1999.
- [6] E. Colizzi. "Thermal Balance Testing: A Rigorous Theoretical Approach to Stabilization Criteria Based on Operative Re-Definition of Thermal Time Constant." / AIAA 2012-3405, 42-nd International Conference on Environmental Systems, 15-19 July 2012. San Diego, California. - 16 p.
- [7] Трансформаторы силовые. Методы испытаний и измерений. - М.: ИПК Стандартов, 1996.
- [8] Z. Godec. "Steady-State Temperature Rise Determination." Automatika, 33 (1992) 3-6, - P. 129-134.
- [9] IEC 60044-1. "Instrument transformers - Part 1: Current transformers." 2003. - 116 p.
- [10] IEC 60726-1982. "Dry-type power transformers." 1982.
- [11] Z. Godec, V. Kuprešanin. "Temperature rise of power transformers: commons and proposals to IEC 60076-2:2011." / 3-rd International Colloquium Transformer Research and Asset Management, October 2014. - 10 p.
- [12] IEC 60076-2. "Power transformers - Temperature rise." 2011.
- [13] Омметр «ВИТОК». / - Пенза: ФГУП «НИИЭМП». <http://www.penzapribor.ru>.

- [14] Прибор для испытания трансформаторов «ПИТ». / - Минск.
<http://www.electronpribor.ru/files/products/pit.pdf>.
- [15] Testo-105 - пищевой термометр (Lebensmittel Thermometer). / - М.: ООО «ТэстоРус», - 12 с. <http://www.testo.ru>.
- [16] Лупачев А.А., Сапелкин И.В., Серов Н.А., Бехтин Ю.С., Шостак А.В. Технология динамического измерения постоянной физической величины. / Сборник докладов. 25-th National Scientific Symposium with international participation "METROLOGY and METROLOGY ASSURANCE 2015", September 7-11, 2015. Sozopol, Bulgaria. - P. 163-174.
- [17] A. Lupachev, I. Sapelkin, A. Smagin, Yu. Bekhtin. Interval criterion of the end of the transient in the measuring circuit. / Proceedings of 26-th National Scientific Symposium with international participation "METROLOGY and METROLOGY ASSURANCE 2016", September 7-11, 2016. Sozopol, Bulgaria. - P. 97-103.
- A. Volkov, A. Umnyagina, Yu. Bekhtin, A. Lupachev, T. Kovaleva. Operability of an interval criterion for determining the steady state of the transient in the measuring circuit. / Proceedings of 4-th International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcETRAN 2017, Kladovo, Serbia, June 05-08, ISBN 978-86-7466-692-0. -p. ML11.3.1.1-4.

Допустимые уровни подводного шума при сертификации гражданских судов

А. М. Еняков, О. А. Панин
НИО-5 «Метрология гидрофизических измерений»
ФГУП «ВНИИФТРИ»
Московская обл., РФ
enyakov@vniiftri.ru

Аннотация — Рассмотрены результаты выполнения европейских проектов по разработке мер по снижению подводного шума судоходства, а также процедуры его измерений, рекомендуемые известными сертификационными обществами DNV (Det Norske Veritas), BUREAU VERITAS и Lloyd's Register. Проведён анализ допустимых норм шумоизлучения судов различного назначения, предъявляемых этими сертификационными обществами.

Ключевые слова — гидрофон; измерение; ограничения по шуму; подводный шум; предельный уровень; стандарты; шумовое загрязнение

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы, связанные с ограничениями воздействия подводного шума антропогенного происхождения на морскую фауну, поднимались авторами настоящей статьи неоднократно [1-3]. В [3] отмечалась неотвратимость введения зарубежными странами тотального контроля за подводным шумоизлучением коммерческих судов, как это уже реализовано в военно-морском флоте большинства развитых стран. При этом чётко просматривается тенденция реального внедрения такого контроля в самом ближайшем будущем, включающая следующие этапы: разработку и утверждение стандартов проведения измерений подводного шума (частично выполнены), обоснование и утверждение требований к допустимым уровням подводного шума, излучаемого судами различного назначения (выполнены тремя авторитетными сертификационными обществами), проведение сертификации всех судов по нормам шумности (уже проводится), разработку и принятие юридической базы для применения санкций в отношении судов, не соответствующих установленным нормам (разрабатываются и частично применяются). Отечественное гражданское судостроение и наши компании-судовладельцы ещё не прочувствовали этой тенденции и не проявляют поэтому интереса к достоверной оценке акустического качества судов, плавающих под российским флагом. Вероятно, не воспринят печальный для нас опыт закрытия европейского неба для многих типов отечественных самолётов из-за превышения ими уровня воздушной шумности. Попытки обратить на это внимание делались неоднократно [1,2,4]. Специалисты Главного научного центра кораблестроения – ФГУП «ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова» утверждают, что «ни в СССР, ни в современной России подводный шум гражданского флота никогда не нормировался, а судовая акустика ориентировалась на вопросы обеспечения санитарных норм и обитаемости судовых помещений» [4]. Авторы [4] отмечают,

что требования к шумоизлучению судна «являются одновременно и эффективным средством конкурентной борьбы при решении вопросов о привлечении того или иного судна к участию в реализации импортно-экспортного контракта, в предоставлении преференций экологически благополучным судам, а также и при согласовании фрахтовых и арендных ставок на суда», и с этим нельзя не согласиться.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Процедуры измерений подводного шума гражданских судов впервые были регламентированы в американском стандарте [6], методология которого была в значительной мере повторена в стандарте ИСО [7], выпущенном в 2016 г. Измерения по этим стандартам проводят на относительно больших глубинах (не менее 150 или даже 300 м), что не очень подходит к условиям прибрежных вод европейских государств (глубина Балтийского и Северного морей не превышает, как правило, 30-50 м), требующим учёта отражений измеряемого шума от морского дна, особенно на низких частотах.

В стандартах [6,7] отсутствуют критерии для оценки соответствия испытываемого судна каким-либо нормам по допустимому уровню подводного шума. А такие нормы нужны, если не забывать о приоритетах деятельности Международной Морской Организации IMO (International Maritime Organization) и Международного Совета по Исследованию Моей ICES (International Council for the Exploration of the Sea), касающихся борьбы с «шумовым загрязнением» судоходных участков морей и океанов для защиты морской фауны. Одним из первых такие нормы установило норвежское классификационное общество DNV (Det Norske Veritas). Это общество было основано в 1864 г. и до настоящего времени является несомненным авторитетом в области оценки технического состояния судов, в регистр которого включено более 20 % судов мирового флота. В Правилах DNV¹ [8] приведены критерии для классификации судов различного назначения по уровню излучаемого ими подводного шума, соответствие которым относит тестируемое судно к классу малошумных.

Регламентируемая Правилами процедура испытаний предполагает измерения на мелководье, но реализована в норвежском фьорде значительной глубины и с наклонным дном. Такая реализация не может быть распространена на полигоны или какие-либо измерительные стенды евро-

¹ Более подробное изложение документа DNV приведено нами в [1]

пейского мелководья. К тому же рекомендуемая Правилами DNV [8] процедура измерений не была подкреплена какими-либо показателями их точности, без которых заключение о классификации судна как малозумного, особенно для случаев, когда уровень измеренного шума близок к установленной норме, может быть оспорено.

Отсутствие международных стандартов на процедуры измерений подводного шума с установленными показателями точности их результатов, а также достижимых норм на допустимые уровни шумоизлучения судов различного назначения, вероятно, инициировали разработку более прозрачной и более пригодной для реализации, чем в [6] и в [8], методики измерений подводного шума коммерческих судов с обоснованной оценкой показателей точности. Работы по проектам SILENV (Ships oriented Innovative soLutions to rEduce Noise & Vibrations – Инновационные решения по снижению шума и вибраций на судах) [9] и AQUO (Achieve QUIeter Oceans by shipping noise footprint reduction) [10], финансируемые в рамках 7-й Рамочной программы Евросоюза, были выполнены в 2009-2015 гг.

В проекте SILENV участвовали 15 организаций из 8 европейских стран, включая научно-исследовательские центры, университеты, предприятия судостроения и одно сертификационное общество. Лидером проекта было Французское судостроительное объединение DCNS SA, крупнейшая компания военного кораблестроения в Европе (корветы, фрегаты, десантные корабли, авианосцы, дизельные и атомные подводные лодки), в лице своего структурного подразделения DCNS RESEARCH. Одной из целей проекта было введение обоснованных ограничений по шуму (подводному и воздушному), излучаемому во внешнюю среду, а также шуму и вибрациям в судовых помещениях на основе предложенных конструкционных решений и существующих правил. Эти ограничения, основанные на действующих нормах, должны были быть подтверждены выявлением наиболее критических источников шума, все большим пониманием их воздействия на человека и морскую фауну в совокупности с оценкой их экономической целесообразности. Предложенные в проекте ограничения по допустимому уровню подводного шума судна для двух ходовых режимов: экономичного (transit – 85 % проектной скорости хода) и тихого (quiet – 11 узлов) хода, представлены на рис. 1.

По завершении проекта в базу данных включили результаты измерений уровней вибрации, подводного и воздушного шума 171 судна. Оказалось, что большинство судов (60 %) соответствуют ограничениям по воздушному шуму, третья часть (32 %) – по шуму и вибрациям на борту и только 11 % – предложенным ограничениям на подводный шум [9].

Такие результаты не могли удовлетворить ни экологов, ни европейских судовладельцев, в собственности которых находилось более 87000 рыболовных судов со средним возрастом 23 года (данные на 2008 г. [9]). Поэтому естественным продолжением проекта SILENV стал проект AQUO, сфокусированный, в основном, на проблемы снижения подводного шума от судоходства.

В их числе стояли задачи разработки практических рекомендаций по выявлению и подавлению источников повышенного шума корабля как на стадии его проектирования и постройки, так и в процессе эксплуатации, по оптималь-

ному выбору ходовых режимов при проходе судна в акватории, особенно чувствительной для морской фауны. Едва ли не самой важной задачей проекта была разработка проекта европейского стандарта на процедуры измерений подводного шума коммерческих судов, выполняемые как в глубоком море, так и на мелководье. Участниками проекта были 13 организаций из 8-ми европейских стран, в том числе представители Ассоциации европейских судостроителей (CESA – The Community of European Shipyard Associations) из 17 стран, авторитетного сертификационного общества (Bureau Veritas, Франция – вторая компания в мире по выручке на рынке сертификационных услуг), университетов и научно-исследовательских организаций, специализирующихся в областях биоакустики, гидродинамики, материаловедения, измерении шумов и вибрации и пр. Как и в SILENV, проект возглавлял французский DCNS RESEARCH.

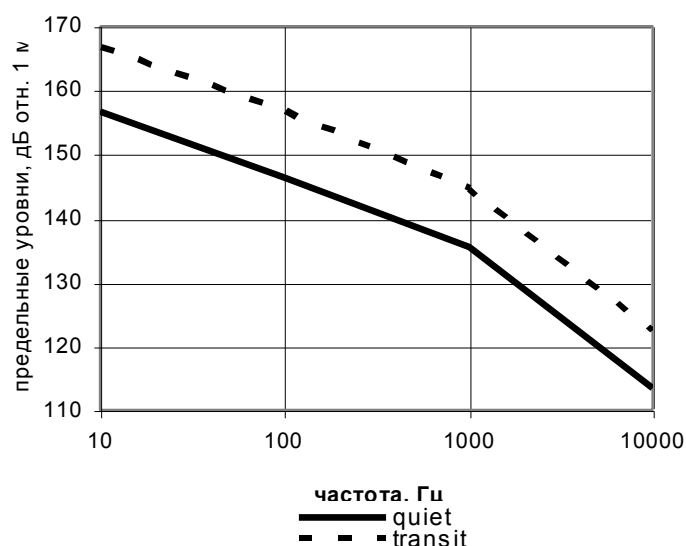


Рис. 1. Предельные спектральные уровни подводного шума коммерческих судов в режиме «тихого» (quiet) и экономичного (transit) хода, предложенные в проекте SILENV

Разработанная в рамках проекта процедура измерений подводного шума учитывает особенности измерений на европейском мелководье, опередив тем самым разработку будущего международного стандарта ISO 17208-2. Наиболее важным результатом выполнения проекта является исчерпывающая оценка неопределённости измерений. Проведённые в рамках проекта натурные измерения подтвердили достаточно хорошую повторяемость результатов по сравнению с измерениями, выполняемыми в соответствии с существующими стандартами [6,7]. Эта процедура, связанные с её выполнением неопределённости измерений и предельные уровни шумоизлучения для коммерческих судов зафиксированы в «Правилах», выпущенных по результатам выполнения проекта компанией Bureau Veritas (далее – BV) [11].

Одной из особенностей установленной в «Правилах» BV процедуры измерений является то, что испытываемое судно совершает повторные проходы (галсы) не на одной и той же дистанции от линии прохода до гидрофонов, как это регламентировано в существующих стандартах [6, 7], а на 3-х разных, как это показано на рис. 2, причём на каждой дистанции выполняют по 2 прохода – один правым к гидрофонам бортом, а второй – левым. Такое усло-

вие несколько усложняет процедуру проведения измерений, но обеспечивает более достоверную оценку их результатов.

На рис. 2 обозначены: Beginning – начало испытаний; End – окончание испытаний; CPA – направление в точку максимального приближения судна к измерительной системе во время каждого прохода; COMEX – точка начала измерений; FINEX – точка окончаний измерений; d_{CPA} – номинальная дистанция между измерительной системой и точкой на CPA для данного прохода.

Вторая особенность новой процедуры связана с ужесточением требований к постановке гидрофонов. Если в стандартах [6,7] гидрофоны можно устанавливать с вспомогательного судна (заякоренного или дрейфующего) или буя (плавающего на поверхности или заякоренного притопленного), то в «Правилах» применение вспомогательного судна исключается, так как это приводит к увеличению неопределённости измерений. При постановке на мелководье три гидрофона должны располагаться по вертикальной линии с помощью притопленного буя и лежащего на дне груза. При постановке гидрофонов в глубоком море «Правила» рекомендуют использовать плавающий на поверхности моря буй и подвешенный к нему на упругой развязке (от поверхностного волнения) притопленный буй. Существенно отличаются и расстояния между гидрофонами, рекомендуемые «Правилами», с одной стороны, и существующими стандартами, с другой. Рекомендуемые BV схемы постановки гидрофонов показаны на рис. 3.

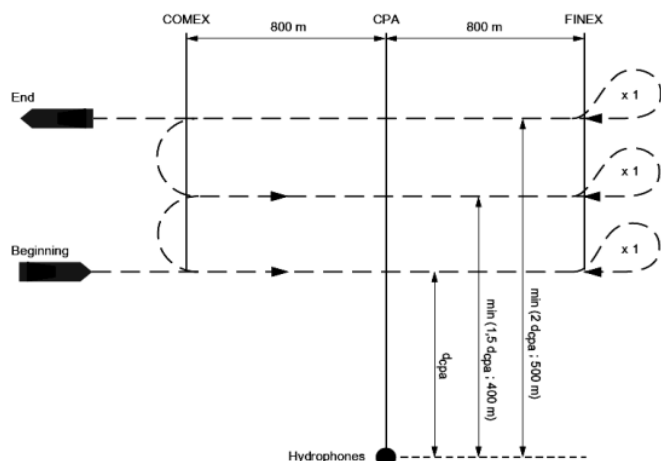


Рис. 2. Схема движения судна относительно измерительной системы [11]

Другие отличия «Правил» BV от требований стандартов [6,7] и Правил DNV [8] заключаются в следующем:

- «Правилами» BV предписано, чтобы поверхность морского дна при мелководных измерениях была по возможности плоской, без существенных наклонов, что не совпадает с рекомендациями, изложенными в Правилах DNV [8];
- регламентируемая «Правилами» BV минимальная глубина в месте проведения глубоководных измерений (более 200 м) превышает указанную в [7], и не соответствует условиям американского стан-

дарта [6]. По «Правилам» BV мелководные измерения проводят на глубинах не менее 60 м, а в Правилах DNV [8] – не менее 30 м;

- гарантируемая «Правилами» BV при соблюдении процедуры измерений неопределённость не превышает 4 и 3,5 дБ для измерений на мелководье и в глубокой воде соответственно, что превышает значения неопределённости, заявленные в американском стандарте [6] (от 1,5 до 3 дБ при использовании трёх гидрофонов), но несколько ниже значений, оценённых в стандарте ISO [7] (от 3 до 5 дБ в зависимости от частотного диапазона) для измерений в глубоком море;
- в Правилах DNV нет оценки точности измерений подводного шума.

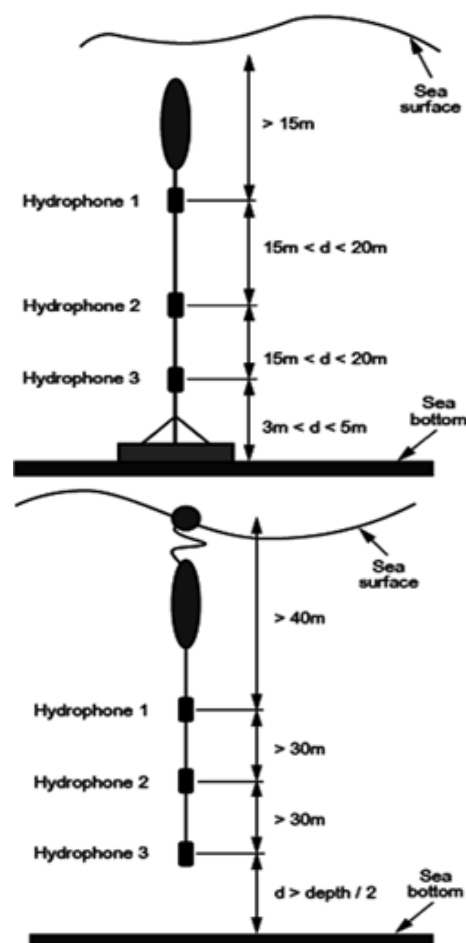


Рис. 3. Рекомендуемые BV схемы постановки гидрофонов на мелководье (вверху) и в глубоком море (внизу)

Особое внимание вызывают установленные в «Правилах» BV предельные нормы на допустимые уровни шумоизлучения, соблюдение которых даёт возможность получения для судна сертификата фирмы Bureau Veritas. В отличие от норм норвежского DNV [8], предъявляющих различные требования к гражданским судам (для отнесения их к классу малошумных) в зависимости от их назначения, нормы Bureau Veritas относятся ко всем коммерческим судам с винтовым движителем, разделяя их только

на «контролируемые» (controlled) и «улучшенные» (advanced), под которыми, вероятно, понимаются суда современной постройки, в конструкции которых учтены рекомендации (в том числе и проекта SILENV) по снижению шумности. Допустимые пределы шумности в виде спектральных (т.е. в полосах 1 Гц) уровней звукового давления, приведённых к опорному расстоянию 1 м, показаны графически на рис. 4, на котором сплошные линии соответствуют уровням при измерениях на мелководье (на частотах выше 200 Гц) и в глубоком море, а пунктирные учитывают низкочастотную поправку (LF) на мелководье, зависящую от осадки судна и угла между линией, соединяющей акустический центр судна со средним (в цепочке) гидрофоном, и горизонтальной плоскостью. На рис. 4 пунктирные кривые приведены в качестве примера для судна с осадкой кормовой части, равной 7,5 м и углом 10°.

Представляется интересным сравнить нормы шумоизлучения, предъявляемые норвежским DNV [8] для отнесения судов различного назначения к классу малошумных, и предельные нормы для выдачи сертификата Bureau Veritas [11].

Такое сравнение проиллюстрировано на рис. 5 в виде частотных зависимостей допустимых уровней подводного шума в третьоктавных полосах (в дБ относительно 1 мкПа), приведённых к стандартной дистанции 1 м.

Тонкие линии на этом рисунке представляют предельные нормы DNV, а толстые – нормы Bureau Veritas. Как видно из рисунка, установленные Bureau Veritas предельные уровни шума для современных («улучшенных») судов (коричневая жирная линия) ниже уровней, предъявляемых к различным судам по норвежским правилам. Исключение составляют лишь малошумные научно-исследовательские и рыбопоисковые суда, к шумоизлучению которых предъявляются повышенные требования. Но для них и фирма Bureau Veritas сделала специальную оговорку, отнеся их к классу «specified vessel» с рекомендацией предъявлять к ним требования Объединённого научно-исследовательского отчёта ICES CRR 209 [12] Международного Совета по Исследованию Морей (ICES), на которые опираются и нормы норвежского DNV.

Важно, что «Правила» Bureau Veritas допускают существенное повышение допустимых уровней шумоизлучения на частотах ниже 100 Гц, обосновывая это более достоверной (по сравнению с действующими стандартами) оценкой измеряемых шумов, особенно на мелководье. Такая оговорка снимает многие коллизии, возникающие при сертификации судна по низкочастотному шуму на разных полигонах [1,5].

В начале 2018 г. опубликовало свои нормы на допустимые уровни подводного шума гражданских судов [12] и самое известное в мире сертификационное общество – Lloyd's Register (далее – LR). Это общество, созданное в 1760 году, имеет в настоящее время свои филиалы или представительства в 115 странах мира. На 2008 г. класс Регистра Ллойда имеют около 80 % судов, плавающих под флагом Великобритании, и около 28 % судов мирового флота [13]. Поэтому рассмотрение основных положений документа [12], регламентирующего процедуры измерений подводного шума и нормы на допустимые его уровни для классификации судов в Регистре Ллойда вызывает несомненный интерес.

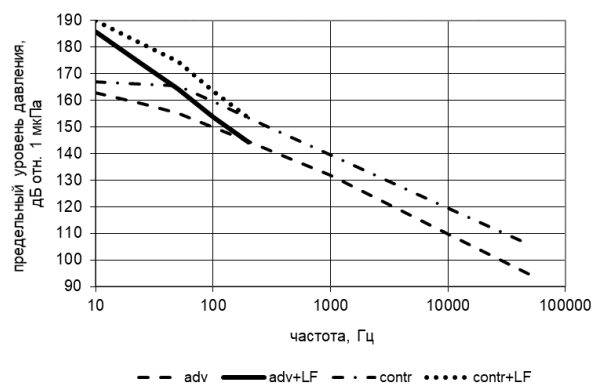


Рис. 4. Пределные уровни шумоизлучения коммерческих судов для их сертификации фирмой Bureau Veritas [11]

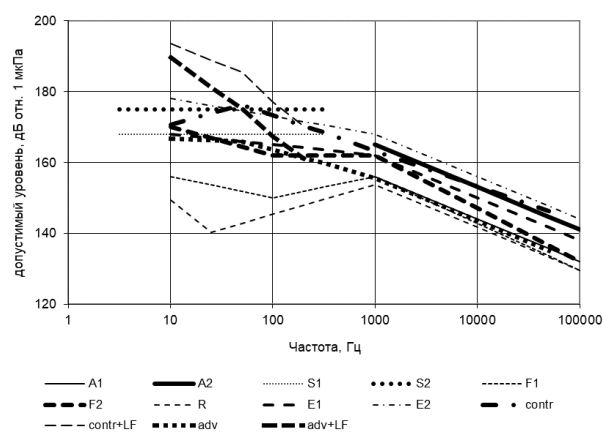


Рис. 5. Допустимые уровни подводного шума в третьоктавных полосах (в дБ относительно 1 мкПа), приведённые к стандартной дистанции 1 м для коммерческих судов, по нормам DNV и Bureau Veritas

Установленные LR условия испытаний судна и процедуры измерений опираются на недавно опубликованный стандарт ИСО [7]. Вводимые Регистром нормы на допустимые уровни подводного шума структурированы несколько иным способом, чем это сделано в нормах DNV (там даны предельные уровни для различных типов судов) и Bureau Veritas (там нет градации по типам судов). Нормы Регистра Ллойда [12] предъявляются ко всем гражданским судам независимо от их типа и отличаются только режимами их хода (TRANSIT – нормальный и QUIET – тихий) с повышенными требованиями только к исследовательским (рыбопоисковым) судам (RESEARCH). При этом в режиме TRANSIT любое судно (за исключением, научно-исследовательских, рыбопоисковых судов и судов сейсмозвездки) должно двигаться со скоростью 85 % от максимальной по проекту. Режим тихого хода (QUIET) со скоростью не более 10 узлов предназначен для всех судов, плавающих в экологически чувствительных районах. К рыболовным судам предъявляют критерии QUIET при плавании на типичных крейсерских скоростях (без траления). Исследовательские (рыбопоисковые) суда испытывают на скорости 11 узлов в соответствии с рекомендациями ICES [12]. Эти нормы проиллюстрированы на рис. 6 в виде допустимых уровней звукового давления в третьоктавных полосах, приведённых к опорной дистанции 1 м.

Основные отличия документа LR от международного стандарта [7], на который он опирается, заключаются в следующем:

- нормы и процедуры, регламентируемые Регистром Ллойда, распространяются на измерения не только в глубокой воде, как в стандарте ИСО, но и на мелководье с введением дополнительных процедур и специальных поправок;
- несмотря на отсылку к стандарту ИСО [7], нормы LR распространяются на более узкий диапазон частот – от 10 Гц до 10 кГц, чем требуется по стандарту ИСО (от 10 Гц до 20 или даже до 50 кГц), что не в полной мере характеризует акустические качества испытываемого судна;
- регламентируемые LR процедуры допускают измерения с неопределённостью, превышающей установленную в стандарте ИСО, оговаривая при этом необходимость введения поправки в установленный допустимый уровень звукового давления, который должен быть снижен на разницу между неопределённостью, полученной при испытаниях, и неопределённостью по стандарту ИСО.

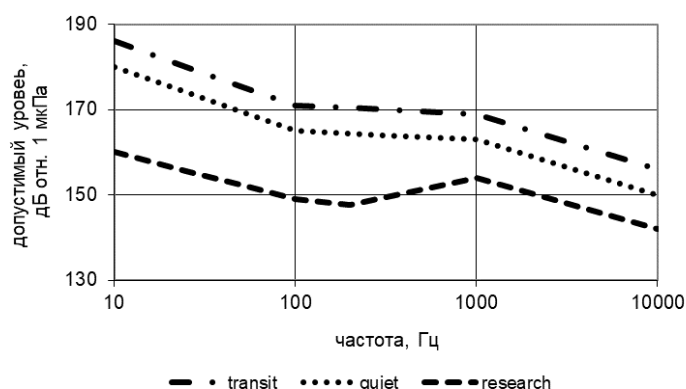


Рис. 6. Допустимые уровни подводного шума в третьоктавных полосах, приведенные к стандартной дистанции 1 м, для коммерческих судов по нормам LR

Критерием успешной сертификации судна в Регистре Ллойда является то, что уровни его измеренных подводных шумов в каждой третьоктавной полосе не превышают установленных норм. При этом допускается наличие несоответствия лишь в какой-либо одной полосе с превышением не более 3 дБ. Но «Правилами» BV установлено, что условный знак соответствия требованиям по шумности может быть присвоен судну лишь в том случае, если ни одно из значений уровня его подводного шума (т.е. для 38 третьоктавных частотных полос) не превышает допустимых пределов. Заметим, что в частотном диапазоне от

10 Гц до 50 кГц, нормируемом BV, имеется 38 контрольных значений, а Регистр Ллойда контролирует частотный диапазон от 10 Гц до 10 кГц только с 30-ю значениями. Эти обстоятельства, а также отмеченная выше возможность зачёта результатов с большей, чем в стандарте ИСО, неопределённостью указывают, что LR даёт некоторые послабления судовладельцам по сравнению с нормами BV. Это подтверждает и сравнение допустимых уровней шумоизлучения, нормируемых сертификационными обществами Lloyd's Register и Bureau Veritas, проиллюстрированной на рис. 7 в виде предельных уровней звукового давления (в третьоктавных полосах), приведённых к дистанции 1 м.

Это сравнение показывает, что нормы BV существенно жёстче требований LR, и это нельзя объяснить небольшим различием в оценке установленной неопределённости измерений (см. выше).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение ещё раз отметим, что, несмотря на некоторые различия в требованиях опубликованных нормативных документов, их выпуск свидетельствует о намерении зарубежных стран реализовать контроль акустического качества гражданского морского флота с целью уменьшения шумового загрязнения мирового океана.

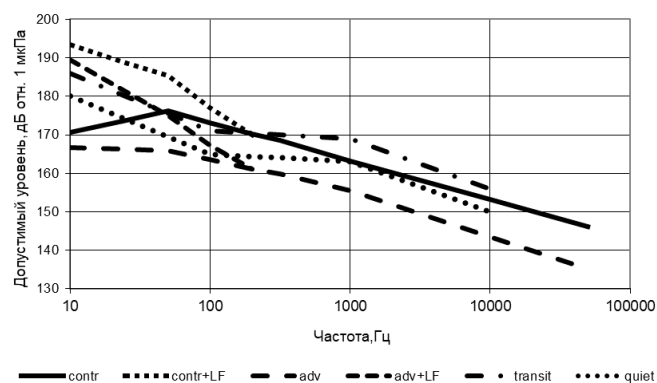


Рис. 7. Допустимые уровни подводного шума гражданских судов по нормам Bureau Veritas (contr и adv) и Lloyd's Register (transit и quiet)

На очереди введение ограничительных мер на плавание в экологически чувствительных регионах. И к этому следует готовиться отечественному флоту и судостроению.

Титульные листы рассмотренных документов показаны на рис. 8.



- [11] Bureau Veritas. Rule Note NR 614. Underwater Radiated Noise (URN), February 2017.
- [12] Underwater Noise of Research Vessels – Review and Recommendations, ICES, Cooperative Research Report No. 209, May 1995.
- [13] Lloyd's Register: ShipRight. Design and Construction - Additional Design and Construction Procedure for the Determination of a Vessel's Underwater Radiated Noise, Электронный ресурс: <https://goo.gl/nmNf2E>.

Рис. 8. Нормативные документы, регламентирующие допустимые уровни подводного шума при сертификации гражданских судов

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.М. Еняков, О.А. Панин, С.В. Сильвестров, “О необходимости оценки неопределенности результатов измерений подводного шума кораблей,” Вестник метролога, № 3, с. 20-32, 2015.
- [2] А.М. Еняков, О.А. Панин, С.В. Сильвестров, “Проблемы и перспективы стандартизации измерений подводного шума, излучаемого коммерческими судами,” Альманах современной метрологии, № 5, с. 117-156, 2015.
- [3] А.М. Еняков, О.А. Панин, “Особенности измерений подводного шума с борта вспомогательного судна,” Вестник метролога, № 1, с. 3-11, 2018.
- [4] В.А. Калью, В.И. Таровик, В.Ю. Чижов, “Уменьшение подводной шумности коммерческих судов – актуальная задача судовой акустики,” Материалы XXIV сессии Российского акустического общества и Сессии Научного совета по акустике РАН, с. 218-222, 12-15 сентября 2011.
- [5] А.М. Еняков, “Проблемы и перспективы международной и национальной стандартизации в области гидроакустических измерений,” Законодательная и прикладная метрология, № 4, с. 12-19, 2016.
- [6] ANSI S12.64-2009 Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships - Part 1: General Requirements, American National Standards Institute, USA, 2009
- [7] ISO 17208-1 (2016) Underwater acoustics – Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships – Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes, 2016.
- [8] DNV “Rules for Ships” Part 6, Chapter 24, 2010.
- [9] H. Haimov, “European project “SILENV” – main results and CEHIPAR contribution,” Third International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing, Vigo, Spain, May 2014.
- [10] Ch. Audoly, C. Rousset, E. Baudin and T. Folegot, “AQUO project – research on solutions for the mitigation of shipping noise and its impact on marine fauna – synthesis of guidelines,” Proc. of the 23rd International Congress on Sound and Vibration, Athens, July 2016.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Особенности проведения метрологической экспертизы на этапе технического проектирования кораблей и судов

Н. Н. Скориантов

НИИ кораблестроения и вооружения ВМФ
ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация – В статье представлены основные положения метрологической экспертизы на этапе технического проектирования кораблей и судов. Указанные положения реализуются в рамках Стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года. С учётом специфики метрологического обеспечения в области отечественного кораблестроения основные тезисы доклада могут быть использованы при разработке нового руководящего документа.

Ключевые слова — метрологическое обеспечение; этапы жизненного цикла кораблей и судов; метрологическая экспертиза; техническое проектирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

Распоряжением Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 года № 737-р утверждена Стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года.

Стратегия обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года (далее - Стратегия) является документом стратегического планирования, содержащим систему долгосрочных приоритетов, целей и задач развития системы обеспечения единства измерений.

Дорожной картой выполнения в Министерстве обороны Российской Федерации Плана мероприятий по реализации Стратегии, утверждённой 30 декабря 2017 года, предусмотрена, в том числе, аккредитация научно-исследовательских организаций Министерства на выполнение обязательной метрологической экспертизы изделий и технической документации на них.

Важным для метрологического обеспечения образцов изделий является проведение метрологической экспертизы в целях определения соответствия метрологического обеспечения установленным техническим требованиям, обеспечения качества и повышения надёжности изделий. В то же время, в связи с отсутствием в нормативных правовых актах положений, устанавливающих единые подходы к организации и проведению федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими деятельность в области обороны и безопасности государства, метрологической экспертизы, её эффективность в настоящее время снижена.

Кроме того, актуализация документов по стандартизации оборонной продукции, в том числе документов, регламентирующих вопросы организации и проведения мет-

рологической экспертизы (МЭ), осуществляется не всегда оперативно. В том числе, одним из основных проблемных вопросов метрологического обеспечения в ВМФ является недостаточное внимание и отсутствие системного подхода к вопросам проведения МЭ кораблей и судов на этапах их жизненного цикла и разработки методик измерений.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Корабль является носителем сотен образцов и изделий. На стадии проектирования корабля головным разработчиком выдаются технические задания (технические требования) на составные части опытно-конструкторских работ согласно требованиям ГОСТ РВ 15.201-2003 и ГОСТ РВ 15.203-2001, в которых в обязательном порядке предусматривается проведение необходимых экспертиз, в том числе МЭ на всех этапах жизненного цикла кораблей и судов.

Ниже представлены основные положения метрологической экспертизы на этапе технического проектирования кораблей и судов ВМФ.

1. Метрологическая экспертиза технического проекта (ТП) кораблей и судов (далее в статье – кораблей) является составной частью работ по метрологическому обеспечению (МЛО) продукции и контролю качества проектирования.

2. Целью МЭ при рассмотрении материалов ТП кораблей является оценка конструктивно-технических решений в части выполнения заданных в ТТЗ (ТЗ, ТТТ, ТТ) требований по МЛО целостности облика корабля, привязки и взаимоувязки его составных частей как единого комплекса, решающего специфические, свойственные ему, задачи.

Примечание – Под привязкой и взаимоувязкой понимается доработка комплекта документов для обеспечения совместимости и работоспособности серийных образцов изделий в условиях эксплуатации конкретного корабля с сохранением характеристик, указанных в ТУ.

3. Выводы и предложения по результатам МЭ ТП корабля учитываются головным исполнителем при выборе возможных вариантов принимаемых технических решений в проекте корабля.

4. Объём выполняемых работ при проведении МЭ ТП корабля определяется «Программой МЭ», представленной в разрабатываемом документе в качестве отдельного Приложения.

В «Программе МЭ» ТП корабля должны быть представлены особенности проведения МЭ ТП как этапа жизненного цикла корабля с учётом практического опыта проектирования.

5. МЭ ТП корабля проводится до подготовки проекта решения об утверждении ТП. К сроку проведения МЭ ТП корабля в целом головной исполнитель ОКР обеспечивает представление в комиссию по МЭ ТЗ на разработку (доработку, модернизацию) новых образцов изделий, ТЗ на привязку серийных образцов изделий (далее в тексте – СЧ кораблей) к кораблю с целью обеспечения совместимости их с другими системами.

Техническая документация на СЧ корабля, отсутствующая в составе ТП при проведении МЭ проекта корабля, подвергается последующему контролю головным исполнителем ОКР на достаточность проработок вопросов привязки и совместимости с оформлением акта (заключения).

Примечание – При необходимости для СЧ корабля, отсутствующих на момент утверждения ТП, допускается проведение МЭ на этапе РКД, при этом МЭ СЧ корабля проводится по решению головного исполнителя за счёт его собственного финансирования (затраты предприятия-изготовителя образца изделия) и с учётом замечаний и рекомендаций по результатам МЭ ТП корабля.

6. При наличии в процессе проведения МЭ ТП существенных замечаний (например, по принятым техническим решениям, не позволяющим выполнить требования ТТЗ (ТТТ), или морально устаревшим техническим решениям), которые не могут быть устранены до начала строительства корабля, комиссия по МЭ ТП, может рекомендовать продление сроков выполнения ОКР в установленном порядке.

7. Результаты МЭ ТП корабля, МЭ СЧ корабля, МЭ на привязку серийных образцов изделий представляются в качестве обязательных приложений к «Акту готовности МЛО испытаний», оформляемых в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 51234.

8. Основными задачами МЭ ТП кораблей являются:

8.1 Определение соответствия решений по МЛО в материалах ТП корабля требованиям, заданным в ТТЗ (ТТТ) на корабль, а также требованиям действующих НД;

8.2 Оценка обоснованности состава измеряемых и контролируемых параметров, допустимых пределов их изменения (значений допускаемых отклонений) согласно РД В 319.01.13;

8.3 Оценка обоснованности назначения требований и количественных значений показателей метрологического обеспечения, в том числе характеристик погрешности измерений параметров и показателей достоверности измерительного контроля;

8.4 Оценка полноты и правильности задания в ТЗ на СЧ корабля требований к контролепригодности образцов ВВТ;

8.5 Оценка возможности измерения параметров обитаемости в условиях корабля;

8.6 Оценка правильности выбора и применения в корабельных условиях измерительных систем, измерительных

каналов, СИ и средств контроля с учётом обеспечения заданных в ТТЗ требований к точности измерений и достоверности контроля параметров, схемы передачи размеров единиц величин, возможности соблюдения периодичности поверки СИ при эксплуатации с учётом периодичности технического обслуживания и ремонта образцов изделий, уровня их автоматизации, унификации и стандартизации, возможности бездемонтажной поверки, соответствия номенклатуре приборов, разрешённых для применения;

8.7 Оценка обоснованности отнесения СИ, предполагаемых к установке на корабле, к категории индикаторов;

8.8 Оценка обоснованности состава СИ, исключения избыточности СИ при комплектовании корабля в целом, включая и переносные СИ;

8.9 Оценка возможности создания на корабле автоматизированного рабочего места по метрологическому и диагностическому обеспечению с задачами учёта наличия и состояния СИ, планирования и регистрации выполненных работ, ведения паспортов и формуляров, накопления статистической информации, документирования и планирования результатов измерений и т.д.;

8.10 Оценка возможности создания на корабле помещения корабельной ремонтной метрологической мастерской и определение состава её оборудования;

8.11 Оценка полноты и обоснованности задания в ТЗ на СЧ корабля требований по МЛО и связанных с ним видов обеспечения (информационного, программного, по надёжности, диагностике, безопасности и др.);

8.12 Оценка достаточности задания в ТЗ на СЧ корабля требований по совместимости согласно РД В 319.01.13 (метрологической, программной, информационной, конструктивной и эксплуатационной) образцов изделий;

8.13 Оценка достаточности задания в ТЗ на СЧ корабля требований полноты и правильности применения стандартизованных и (или) аттестованных методик измерений;

8.14 Установление технико-экономической целесообразности разработки и применения измерительных систем, СИ и средств контроля для испытаний и эксплуатации составных частей корабля в соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.596, ГОСТ РВ 15.210, ГОСТ РВ 51234;

8.15 Оценка качества метрологического контроля материалов ТП и документирования результатов контроля в процессе проектирования, проводимого метрологической службой (отделом, подразделением) головного исполнителя в соответствии с требованиями ГОСТ РВ 1.1, ГОСТ РВ 15.002, РМГ 63-2003 и стандартов предприятия;

8.16 Проверка правильности применения наименований и обозначений единиц величин в соответствии с требованиями ГОСТ 8.417;

8.17 Оценка правильности применения терминов и определений по метрологии, установленных в РМГ 29-2013.

9. Метрологической экспертизе подвергается документация ТП на корабль и его СЧ согласно ведомости проектных документов ТП, представляемой головным исполнителем, в том числе:

- справка-отчёт о МЛО ТП корабля;
- пояснительная записка к ТП;
- спецификация на корабль;
- перечень контролируемых параметров и СИ.

Типовые формы документация ТП на корабль (ПКП, ПСИ, ПИ и т.п.) должны быть разработаны проектантами и контрагентами кораблей по формам, указанным в ОСТВ5Р.0731-99, и представлены в разрабатываемом документе в качестве отдельного Приложения.

10. При проведении МЭ ТП корабля используются представляемые разработчиком документы:

- программа МЭ;
- ТТЗ (ТТТ) на корабль;
- заключение по результатам МЭ ТТЗ (ТТТ) на корабль;
- ПМО разработки ТП;
- перечень ТЗ на СЧ корабля;
- заключения по МЭ головного исполнителя на ТЗ СЧ корабля;
- заключения по МЭ контрагентов на СЧ корабля (в т.ч. на привязку серийных изделий на этапе эксплуатации в условиях корабля);
- заключения (замечания) головного исполнителя на документацию СЧ корабля (при их представлении исполнителем СЧ корабля на стадии ТП корабля);
- справка (акт) о реализации плана мероприятий по результатам МЭ на предыдущих этапах;
- ТУ на серийно выпускаемые СЧ корабля;
- нормативные документы.

11. По требованию председателя комиссии по МЭ ТП корабля может быть представлена другая документация из ведомости проектных документов ТП корабля.

12. Требования к организации и порядку проведения МЭ ТП корабля должны быть изложены в разрабатываемом документе в качестве отдельного Приложения.

13. Для устранения недостатков и реализации рекомендаций экспертной комиссии по МЭ ТП корабля головной исполнитель проекта корабля составляет «План мероприятий по устранению недостатков и реализации рекомендаций экспертной комиссии», который должен быть согласован с председателем (заместителем председателя) экспертной комиссии, с военным представительством и государственным заказчиком и утверждён должностным лицом, назначившим экспертную комиссию.

14. Замечания и рекомендации комиссии, включённые в план мероприятий, должны быть учтены при разработке документации на всех последующих стадиях проектирования, строительства и сдачи корабля.

15. Устранение утверждённых государственным заказчиком замечаний экспертной комиссии выполняется до начала этапа постройки корабля.

16. Затраты на проведение МЭ в процессе создания проекта корабля являются составной частью затрат на выполнение соответствующих ОКР. Финансирование работ по МЭ ТП корабля осуществляется в соответствии с требованиями п. 27 Приказа МО РФ от 24.10.2017 № 640 и Приложения к Приказу ГК ВМФ № 439 от 25.11.

Примечание – в Приложении 8 Приказа МО РФ от 2012 года № 222, действующем до 2018 года, определены примерные трудозатраты на проведение метрологической экспертизы образцов ВВТ по видам вооружённых сил, выраженные в человеко-днях.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены основные положения метрологической экспертизы на этапе технического проектирования кораблей и судов ВМФ с учётом специфики метрологического обеспечения в области отечественного кораблестроения.

С целью реализации системного подхода к вопросам проведения МЭ кораблей и судов на этапах их жизненного цикла и разработки методик измерений, в документе, разрабатываемом взамен ГОСТ РВ 8.573-2000, целесообразно предусмотреть раздел, посвящённый метрологической экспертизе на этапе технического проектирования кораблей и судов.

Аттестация испытательного оборудования. Практические рекомендации

Ю. Г. Солонецкий, Ю. И. Шевелев, А. В. Ступников

Отдел координации работ по комплексному метрологическому обеспечению инновационных разработок
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация — В докладе авторами на основе детального анализа документов, регламентирующих выполнение работ по аттестации испытательного оборудования (ИО), а также многолетнего опыта проведения аттестаций ИО широкого спектра, предложен ряд практических рекомендаций по эффективной организации указанных работ. Значительное внимание уделено требованиям, предъявляемым к средствам измерений, входящим в состав ИО.

Ключевые слова — испытательное оборудование; испытания; аттестация

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие и совершенствование техники не может происходить без соответствующего развития измерительных приборов и средств испытаний.

Одной из актуальных проблем является подтверждение соответствия средств испытаний заданным требованиям точности, достоверности и воспроизводимости результатов испытаний.

Говоря о средствах испытаний, прежде всего, следует иметь в виду испытательное оборудование (далее – ИО) и средства измерений (далее – СИ) для определения параметров продукции количественно характеризующих ее свойства или состояния.

Настоящий доклад посвящен не обсуждению организации и порядка проведения аттестации ИО, что само по себе весьма важно, а вопросам места и роли ИО на предприятии, значению аттестации для последующего использования ИО по назначению и тому, какие мероприятия (и почему) следует предусмотреть на этапе разработки ИО, чтобы в последующем оно было востребовано потребителем и могло применяться с максимальной эффективностью.

II. ТРЕБОВАНИЯ К СРЕДСТВАМ ИСПЫТАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

Определение количественных параметров продукции может осуществляться либо без создания воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта либо в процессе проведения испытаний.

В первом случае количественные параметры продукции, как правило, определяются непосредственно с помощью СИ, во втором случае – с использованием средств испытаний.

В подавляющем большинстве случаев при испытаниях современных сложных изделий применяется ИО со встроенными и (или) автономными СИ.

Существующие документы по стандартизации в области обеспечения единства измерений (ОЕИ) рекомендуют, а в определенных случаях предписывают, иметь на предприятиях перечни технических средств с классификацией на СИ, стандартные образцы (СО), эталоны единиц величин (ЭЕВ), ИО, индикаторы и другие.

Формами государственного регулирования СИ, СО, ЭЕВ являются утверждение типа СИ и СО, поверка СИ, аттестация ЭЕВ и т.п.

Применительно к ИО осуществляется его аттестация по [1] и (или) [2] как форма подтверждения соответствия.

Какие последствия для обладателя ИО несет необходимость подтверждения его соответствия в форме аттестации?

Аттестация ИО должна проводиться в соответствии с требованиями и по процедурам, установленным в [1] и [2].

Заказчиком аттестации ИО могут выступать следующие лица:

- владелец ИО, если это ИО является его разработкой, либо если он в договоре поставки не догадался возложить данную «почетную» обязанность на поставщика (разработчика, изготовителя);
- поставщик (разработчик, изготовитель) ИО;
- иные заинтересованные лица.

Для аттестации ИО, используемого при:

- обязательной сертификации продукции;
- при испытаниях продукции на соответствие обязательным требованиям технических регламентов;
- при производстве продукции, поставляемой по контрактам для государственных нужд;
- в других случаях, когда к продукции установлены обязательные требования,

должны применяться СИ и СО утвержденных типов, экземпляры СИ должны быть поверены, методики измерений – аттестованы.

СИ и СО, удовлетворяющие указанным требованиям, в зависимости от условий договора, предоставляются Заказчиком либо исполнителем аттестации ИО.

Какие требования предъявляются к СИ ИО (неважно, автономным или встроенным)?

СИ, предназначенные для измерений количественных характеристик параметров продукции, на основании которых соответствующими должностными лицами принимается решение о соответствии продукции установленным требованиям, безусловно и бескомпромиссно должны быть утвержденного типа и поверены.

Результаты измерений таких СИ указывают в протоколах испытаний продукции.

СИ, предназначенные для измерений параметров воспроизводимых ИО условий испытаний должны быть утвержденного типа и поверены в случае необходимости непрерывного контроля создаваемых ИО условий испытаний с включением соответствующих результатов измерений в протокол испытаний.

Стоит отметить, что на выполнение требований по непрерывному контролю условий испытаний часто настаивают потребители продукции (включают в ТЗ, ТТЗ, договор поставки).

Что касается СИ, предназначенных для измерений служебных параметров ИО, не относящихся к условиям испытаний продукции, а используемые обслуживающим персоналом для поддержания ИО в исправном (рабочем) состоянии, то такие СИ следует калибровать, либо относить к индикаторам.

III. РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании изложенного нами сформулирован ряд рекомендаций Заказчику ИО, т.е. организации, которая планирует приобретение ИО для проведения испытаний, а также Поставщику (разработчику, изготовителю) ИО.

Рекомендации Заказчику ИО:

1. Заказывая разработку и поставку ИО, обязательно включайте в техническое задание следующие требования:

- утверждение типа СИ, входящих в состав ИО, либо использование СИ утвержденных типов;
- проведение первичной поверки СИ, входящих в состав ИО;
- проведение первичной аттестации ИО в соответствии с требованиями [1] и (или) [2].

Примечание: использование измерительной системы (ИС), состоящей из компонентов утвержденного типа возможно только после утверждения типа данной ИС.

2. Заказывая поставку типового ИО (климатических камер, вибростендов и т.д.), не имеющего в своем составе СИ для измерений количественных характеристик параметров испытываемой продукции обязательно включайте в техническое задание требование проведения первичной аттестации ИО в соответствии с [1] и (или) [2].

Даже в этом случае, при прочих равных, предпочтение следует отдавать ИО, СИ которого имеют утвержденный тип и поверены.

Рекомендации Поставщику (Разработчику, Изготовителю) ИО:

1. Для типового ИО (выпускаемого серийно) «не поленитесь» утвердить тип СИ, входящих в его состав.

Здесь речь, прежде всего, идет о СИ, предназначенных для измерений параметров воспроизводимых ИО условий испытаний. Если по каким-либо причинам это не возможно, или вы считаете, что нецелесообразно, предусмотрите возможность использования (подключения) внешних СИ, с помощью которых можно было бы при аттестации подтверждать значения воспроизводимых ИО условий испытаний, а при использовании ИО по назначению – измерять количественные характеристики параметров продукции.

2. Для единичных экземпляров ИО, разрабатываемого под конкретную продукцию, следует утвердить тип ИС, используемой для измерений количественных характеристик параметров продукции и параметров воспроизводимых ИО условий испытаний.

Данные мероприятия, с учетом последующей поверки этих СИ (ИС), позволят оптимальным образом пройти процедуру первичной, а в последующем – периодических, аттестаций ИО.

Для эффективности эти задачи, следует решать комплексно, в рамках одной четырехэтапной работы:

1-й этап – метрологическая экспертиза документации;

2-й этап – утверждение типа СИ (ИС), входящих в состав ИО;

3-й этап – первичная поверка утвержденных СИ (ИС), входящих в состав ИО;

4-й этап – аттестация ИО.

Первый этап проводится при необходимости и предназначен для установления перечня подлежащих утверждению СИ (ИС) с четким определением их метрологических характеристик, а также перечня количественных характеристик ИО.

Начинать эту трех- или четырехэтапную работу надо одновременно с началом разработки самого ИО, чтобы потом «вдруг» не выяснилось, что многое (помимо собственно, воспроизводимых ИО условий испытаний) надо было предусмотреть и заложить в разработку, а теперь без серьезных переделок не обойтись.

IV. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ В ИСПЫТАТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ

В заключение хотелось бы обратить внимание на ИС, входящие в состав ИО.

Что же из себя представляют современные ИС ИО?

ИС это совокупность измерительных каналов (ИК), состоящих из отдельных компонентов, таких как первичные измерительные преобразователи (датчики), контроллеры или модули ввода-вывода (вторичная часть ИК) и устройства отображения информации и управления (монитор).

Метрологические характеристики (МХ) компонентов утвержденного типа известны, но МХ ИК в целом – нет.

Кроме того, используемые связующие компоненты (провода, клеммные колодки, радиоканалы), а также разрабатываемое изготовителем ИО программное обеспечение, могут отрицательно повлиять на МХ ИК.

По этим причинам и следует провести процедуру утверждения типа ИС.

Указанный подход реализуется в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» при проведении работ по аттестации ИО уже много лет и показал свою эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ РВ 0008-002-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования, применяемого при оценке соответствия оборонной продукции. Организация и порядок проведения.
- [2] ГОСТ Р 8.568-2017 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.

Современные подходы к выполнению метрологических работ в незаглушенном измерительном бассейне

А. Е. Исаев, А. Н. Матвеев, И. В. Черников
НИО-5 «Метрология гидрофизических измерений»
ФГУП «ВНИИФТРИ»
Московская обл., РФ
isaev@vniiftri.ru

Аннотация — Приводятся сведения о разработанной в ФГУП «ВНИИФТРИ» технике измерений для выполнения метрологических работ в незаглушенном лабораторном бассейне и результаты её применения для калибровки приемника подводного шума, амплитудно-фазовой калибровки приемников скалярной и векторных величин гидроакустического поля, исследований акустических характеристик материалов, гидрофонов и их носителей различного конструктивного исполнения. Применение техники позволяет существенно расширить возможности метрологических работ в лабораторном бассейне, многократно повысить информативность измерительного эксперимента (в сравнении с тонально-импульсным методом), уменьшить нижнюю частоту измерений по полю с единиц килогерц до сотен герц, получать исчерпывающую модель акустического приемника, по результатам калибровки решать не только задачу верификации, но и задачу валидации приемника.

Ключевые слова — испытательный гидроакустический бассейн; измерения по полю; сигнал с распределенной по частоте мощностью; метод скользящего комплексного взвешенного усреднения

I. ВВЕДЕНИЕ

Метод скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) был разработан в ФГУП «ВНИИФТРИ» для калибровки в гидроакустическом бассейне приёмников, используемых при измерениях уровней подводного шума. За годы применения метода выполнен широкий круг исследований, способствовавший совершенствованию как самого метода СКВУ и его программно-аппаратной реализации, так и расширению области его применения. Оценена степень подавления реверберационных искажений в бассейнах различной формы и размеров, исследованы ограничения и характерные источники погрешностей. На сигналах с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и шумовом сигналах с точностью тонально-импульсного метода выполнены калибровки гидроакустического приёмника (ГП) по полю методом взаимности и методом сравнения с опорным гидрофоном. Составлены и подтверждены международными сличениями, включая ключевые сличения МКМВ, бюджеты неопределённостей калибровки гидрофонов. Впервые в метрологической практике осуществлены амплитудно-фазовая калибровка по полю векторного ГП, а также калибровка приёмника подводного шума, результатом которой является энергетическая чувствительность в третьоктавной полосе частот.

Метод применён при исследованиях акустических характеристик материалов, гидрофонов и их носителей различного конструктивного исполнения. В незаглушенном бассейне с минимальным размером 6 м частотный диапазон калибровки по полю удалось расширить с 3,15 кГц до 100-150 Гц, а верхнюю граничную частоту калибровки векторного приёмника увеличить с 2 кГц до 12,5 кГц.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сегодня можно сказать, что во ВНИИФТРИ разработан и продолжает совершенствоваться техника точных измерений «по полю» (далее техника) в реверберационных полях незаглушенного бассейна. «Know-how» техники является получение подробных частотных характеристик по полю методом СКВУ [1]. Обработке СКВУ подвергают комплексную частотную зависимость пары излучатель-приёмник, измеренную в реверберационном звуковом поле бассейна. Вызванные отражениями осцилляции частотной зависимости подавляют скользящим комплексным взвешенным усреднением и получают частотную зависимость по полю. Взвешивающую функцию рассчитывают, исходя из значений временных задержек отражений в точке приёма относительно прямого сигнала излучателя, тем самым реализуют характеристику пропускания режектирующего пространственного фильтра, настроенного на подавление отражений в измерительном эксперименте [1-3]. Адаптированность пространственного фильтра к сценарию отражений объясняет высокое (не менее 46 дБ) подавление реверберационных возмущений, достаточное для точных эталонных измерений.

В противоположность традиционному тонально-импульсному методу в основе техники измерений положено излучение продолжительных (многократно превышающих время реверберации в бассейне) сигналов с распределённой по частоте мощностью [4, 5]. Для измерений используют весь сигнал. Результат – зависимость по свободному полю в частотном диапазоне излучения, измеренная с требуемой подробностью по частоте. На рис. 1 показаны результаты измерений за один цикл излучения: точкой – тонального импульса, гладкой кривой – ЛЧМ сигнала.

Передавать единицу (т.е. калибровать средство измерений) необходимо на том сигнале, который будут измерять, и в тех условиях, в которых средство измерений будут

применять по назначению. Применительно к измерениям подводного шума это означает калибровку на шумовом сигнале. Отличительной особенностью шумового реверберационного звукового поля в незаглушенном бассейне является его структурирование на разделённые переходной областью зону свободного поля (вблизи излучателя прямая волна излучателя доминирует) и зону диффузного поля (на удалении от излучателя преимущественное направление падения звуковой волны отсутствует) [6]. Принято считать, что в диффузной зоне выполнить измерения по свободному полю невозможно. В силу этого заблуждения задача калибровки на шумовом сигнале на протяжении многих лет не получала своего решения.

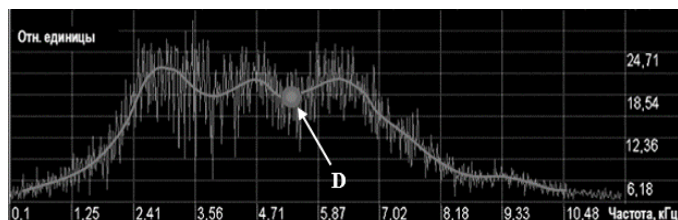


Рис. 1. Результат измерения по полю частотной зависимости методом СКВУ при излучении ЛЧМ сигнала, D – результат, полученный тонально-импульсным методом

Освоить шумовое реверберационное звуковое поле бассейна для выполнения метрологических работ удалось с использованием техники СКВУ [7,8]. На рис. 2 изображены огибающая выходного сигнала гидрофона в диффузной зоне бассейна и результаты измерений в диффузной зоне частотной зависимости по полю. Использование шумового реверберационного поля, существенно отличающегося по свойствам от реверберационного поля ЛЧМ сигнала, позволяет получать результаты измерений с малым числом общих источников погрешности, избежать промахов, повысить достоверность и метрологическую надёжность результатов измерений.

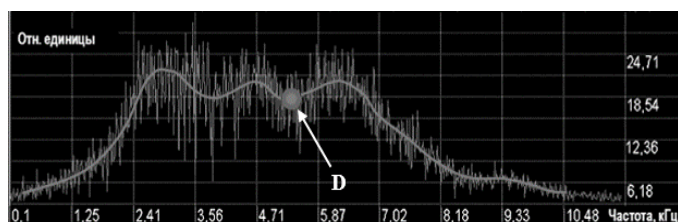


Рис. 2. Частотная зависимость по полю, измеренная по методу СКВУ при излучении шумового сигнала, D – при излучении тонально-импульса

Техника предусматривает применение апостериорного либо априорного редактирования экспериментальной частотной зависимости, которые выполняют для уменьшения погрешности результата измерений на основе информации о частотных свойствах излучателя и приёмника, трактов излучения и приёма эталонной установки [5,9].

Техника СКВУ позволяет измерять чувствительность ГП к скалярной (звуковое давление) и векторным (колебательная скорость, градиент давления) величинам акустического поля абсолютным методом с использованием обратимого приёмника звукового давления [3,10-11], и относительным методом с использованием опорного гидрофона [12-13]. О реализуемой техникой точности измерений можно судить, сопоставив представленные на рис. 3 характеристики направленности приёмника колебательной

скорости, измеренные в диффузной зоне с использованием техники и в свободном поле (тонально-импульсный метод). Измерения выполнены на частотах значительно превышающих граничную частоту рабочего диапазона приёмника 12 кГц с тем, чтобы оценить близость результатов при измерениях характеристик сложной формы и большим числом глубоких (до 35 дБ) провалов.

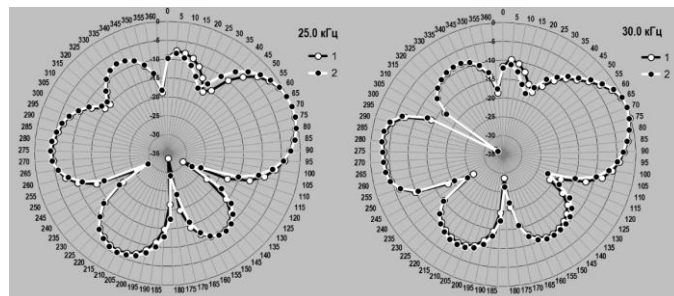


Рис. 3. Частотная зависимость по полю, измеренная по методу СКВУ при излучении шумового сигнала, D – при излучении тонально-импульса

В зависимости от условий эксперимента положение акустического центра приёмника определяют либо акустическим способом [1], либо определяют смещение акустического центра преобразователя относительно опорной точки [12,14-15]. Точность измерения фазовых характеристик обеспечивают, выполняя измерения методом неподвижной опорной точки и позиционируя опорную точку по лучу лазера [14,16]. Способ определения фазового угла чувствительности гидрофона по методу взаимности позволяет исключить составляющую погрешности, обусловленную несовпадением геометрического и акустического центров [17], при этом обеспечиваются значительно меньшие в сравнении с методом неподвижной опорной точки разброс результатов и зависимость разброса от частоты измерений [15].

Возможность выборочного подавления влияния отражений при обработке по методу СКВУ позволила разработать простой в реализации способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от материала [18,19]. Преимуществами способа является повышение точности измерений за счёт исключения влияния сигналов, отражённых границами бассейна, а также получение подробной (непрерывной) частотной зависимости коэффициента отражения.

Возможность быстро выполнять измерения при тех же точностях принято относить к разряду второстепенных и несущественных с точки зрения метрологии. На рис. 4 изображён внешний вид массогабаритной модели гидроакустического рекордера «AURAL M2».

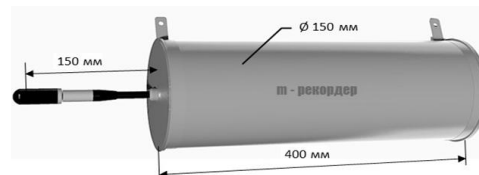


Рис. 4. Внешний вид массогабаритной модели гидроакустического рекордера (m-рекордер)

На рис. 5 представлены результаты калибровки модели в диапазоне от 100 Гц до 20 кГц.

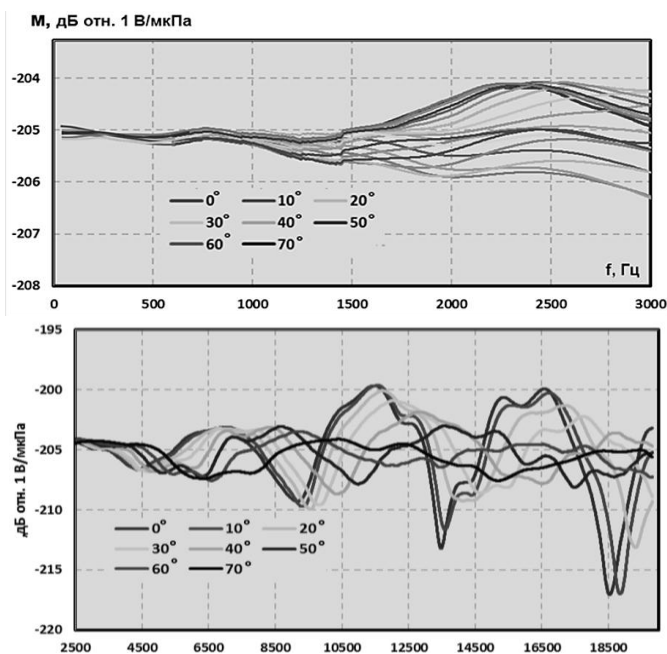


Рис. 5. Частотные зависимости чувствительности m-рекордера в зависимости от угла падения звуковой волны

С учётом реверберационных пауз такие измерения то-нально-импульсным методом могут занимать до нескольких суток до недель, тогда как с использованием техники получение набора амплитудно- и фазочастотных характеристик приёмника с мелким шагом по частоте при изменении угла падения звуковой волны по продолжительности немногим превосходит традиционные измерения характеристики направленности на частоте [4]. Продолжительный измерительный эксперимент нарушает единство условий измерений, что неизбежно влечёт за собой увеличение погрешности, поскольку возникают дополнительные источники, связанные с изменением климатических условий, помеховой обстановки, временной нестабильностью, случайными внешними факторами и т.п.

Отдельно следует отметить возможность измерять с использованием техники чувствительность ГП по полю вплоть до частот, на которых влиянием дифракции можно пренебречь, исследовать развитие дифракционных искажений начиная с их зарождения на очень низких частотах, которые до недавнего времени были недоступны для калибровки по полю не только рекордера, но и гидрофона [20,21].

С появлением международных стандартов, регулирующих шумовое загрязнение морской среды, при измерениях подводного шума помимо уровня шума в третьоктавной полосе частот потребовалось определять погрешность измерения пикового значения и экспозиции звукового события (например, удара морского копра) [22].

Задачи подобного рода в метрологии принято решать прямым сравнением сигналов идеального (образцового) и поверяемого приёмников. Выполнению такого сравнения для градуировки ГП препятствует реверберация звука в бассейне.

Для подавления искажений сигнала, обусловленных реверберацией звука в бассейне, техника была дополнена приёмом, позволяющим получать сокращённое описание

звукового поля в бассейне, справедливого лишь для двух точек – мест расположения излучателя и приёмника [23]. Такое описание в ущерб его универсальности позволяет представить излучатель и приёмник в реверберационном звуковом поле бассейна линейным четырёхполюсником, применить математический аппарат передаточных функций для подавления реверберационных искажений сигнала приёмника с приемлемым для калибровки качеством, решать задачу калибровки ГП на сигнале заданной формы.

На рис. 6-8 представлены результаты использования передаточной функции бассейна для восстановления шумовых и импульсных сигналов.



Рис. 6. Опорный, восстановленный и разностный спектры окрашенного шума



Рис. 7. Восстановленный и опорный сигналы белого шума

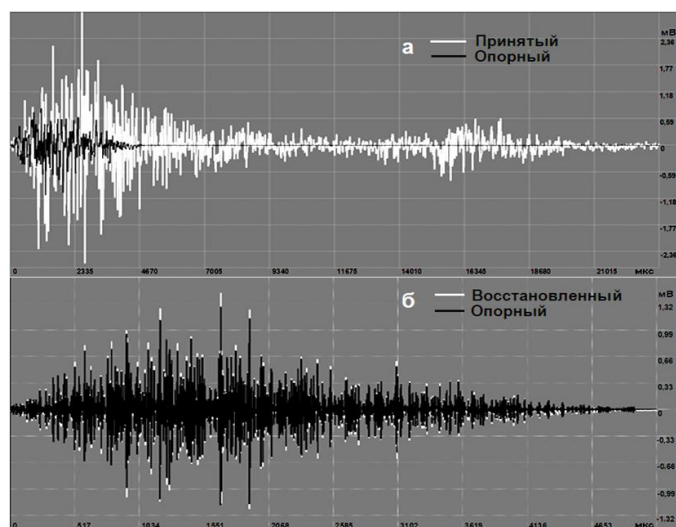


Рис. 8. Осциллограммы импульсных сигналов: на выходе приёмника в реверберационном звуковом поле, опорного и восстановленного

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Техника реализована в виде программно-аппаратного комплекса, аппаратная часть которого включает в себя измерительные приборы, электронные узлы и систему подводного позиционирования эталонных установок ГЭТ 55-2017. Программные средства управления параметрами процедуры измерений и обработки данных построены по модульному принципу в виде графических интерфейсов (окон операционной системы Windows).

Техника измерений в реверберационных полях незаглушенного бассейна:

- демонстрирует высокие, на уровне первичных эталонов, показатели качества измерений по свободному полю на частотах от 500 Гц до 500 кГц вне зависимости от близости реализуемого в эксперименте реверберационного поля к диффузному полю;
- позволяет выполнять быстрые измерения по полю в широком диапазоне частот с эталонной точностью и требуемой подробностью по частоте (до практически непрерывных), получать характеристики направленности, амплитудно и фазочастотные характеристики чувствительности акустических приёмников – то есть, в отсутствие безэхового гидроакустического бассейна выполнять измерения как в безэховой камере;
- позволяет существенно расширить частотный диапазон измерений по полю в бассейне в сторону низких частот, определять метрологические характеристики приёмника по диффузному полю и в полосах частот.

Созданная техника существенно изменяет общепринятые представления о возможностях метрологических работ в лабораторном бассейне, позволяет многократно повысить информативность измерительного эксперимента (в сравнении с измерениями на тональных импульсах), получать исчерпывающую модель акустического приёмника, по результатам калибровки решать не только задачу верификации, но и задачу валидации приёмника.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Е. Исаев, “Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля,” Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 369 с., 2008.
- [2] А.Е. Исаев, “Критерий качества реализации условий свободного поля при градуировке гидроакустического приемника в бассейне с отражающими границами,” Измер. техн., № 5, с. 48-53, 2014.
- [3] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, С.В. Сильвестров, Патент № 2390968 “Способ градуировки гидрофона по полю при излучении непрерывного сигнала в измерительном бассейне с отражениями,” Опубликовано 27.05.2010, БИ № 15.
- [4] А.Е. Исаев, А.М. Поликарпов, И.В. Черников, “Акустические сигналы и поля для метрологических работ в лабораторном гидроакустическом бассейне,” Альманах современной метрологии, ФГУП «ВНИИФТРИ», № 2, с. 76-102, 2015.
- [5] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов, “Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала,” Акуст. журн., Т. 59, № 6, с. 773-781, 2013.
- [6] Д.З. Лопашев, “Исследование звукового поля в большом измерительном бассейне,” Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР : Исследования в области акустических и гидроакустических измерений, М.: Стандартгиз, Вып. 73(133), с. 31-40, 1963.
- [7] А.Е. Исаев, Патент № 2568070 “Способ измерения комплексной частотной зависимости передаточного импеданса пары излучатель-приемник в свободном поле,” Опубликовано 10.11.2015, БИ № 31.
- [8] А.Е. Исаев, И.В. Черников, “Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала,” Акуст. журн., Т. 61, № 5, с. 1-9, 2015.
- [9] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, “Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника,” Акуст. журн., Т. 56, № 5, с. 651-654, 2010.
- [10] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов, “Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности,” Акуст. журн., Т. 60, № 1, с. 48-55, 2014.
- [11] А.М. Еняков, А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев и др., “Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот от 250 Гц до 200 кГц,” Измер. техн., № 6, с. 33-37, 2011.
- [12] А.Е. Исаев, Патент № 2513446 “Способ определения амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик чувствительности по полю гидроакустического приемника,” Опубликовано 20.01.2016, БИ № 2.
- [13] А.Е. Исаев, Патент № 2563603 “Способ определения чувствительности по полю гидроакустического приемника,” Опубликовано 20.09.2015, БИ № 26.
- [14] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, А.М. Поликарпов, Н.Г. Щерблюк, “Измерение фазочастотной характеристики чувствительности гидрофона по полю методом взаимности,” Измер. техн., № 6, с. 56-58, 2013.
- [15] А.Е. Исаев, Патент № 2516607 “Способ определения пространственного смещения акустического центра гидрофона относительно его геометрического центра,” Опубликовано 20.05.2014, БИ № 14.
- [16] G. Hayman, S. Robinson, “Phase calibration of hydrophones by the free-field reciprocity method,” Proc. of the 11th European Conference on Underwater Acoustics, Edinburgh, pp. 1437-1444, 2012.
- [17] А.Е. Исаев, Патент № 2509441 “Способ определения фазового угла комплексной чувствительности гидрофона методом взаимности,” Опубликовано 10.03.2014, БИ № 7.
- [18] А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, Патент на изобретение № 2655478 “Способ измерения частотной зависимости коэффициента отражения звука от поверхности,” Опубликовано 28.05.2018, БИ № 16.
- [19] А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, А.М. Поликарпов, “Измерение частотной зависимости коэффициента отражения звука в условиях незаглушенного бассейна,” Измер. техн., № 4, с. 53-56, 2018.
- [20] А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, Патент на изобретение № 2655049 “Способ калибровки гидрофона по полю на низких частотах,” Опубликовано 23.05.2018, БИ № 15.
- [21] А.Е. Исаев, А.С. Николаенко, “Лабораторная калибровка гидроакустического приемника по полю на низких частотах,” Измер. техн., № 1, с. 54-59, 2018.
- [22] S.P. Robinson, P. Lepper, R. Hazelwood, “Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement,” ISBN: NPL, Crown Copyright, No. 133, 2014, ISSN: 1368-6550.
- [23] А.Е. Исаев, И.В. Черников, А.С. Николаенко, “Подавление реверберационных искажений сигнала приемника с использованием передаточной функции бассейна,” Акуст. журн., Т. 63, № 2, с. 165-174, 2017.

Результаты метрологической аттестации программно-аппаратного имитационного комплекса стенда отладки и моделирования программного обеспечения

В. В. Беляева, Е. А. Горбунов, В. А. Грановский, А. И. Стариков, В. В. Прокопович, А. В. Шафранюк

АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор»

Санкт-Петербург, Россия

vgranovsky@eprib.ru, wm.prokopovich@yandex.ru, andrey.shafanyuk@mail.ru

Аннотация – Доклад посвящён проведённой коллективом авторов аттестации программно-аппаратного имитационного комплекса стенда отладки и моделирования программного обеспечения гидроакустического комплекса. Затрагиваются вопросы написания программы и методики аттестации стенда, разработки технологического программного обеспечения и основным результатам, полученным при её проведении. Дается общая оценка результатов работы и рассматриваются основные проблемные вопросы и пути их решения.

Ключевые слова — метрологическая аттестация, стенд, отладка программного обеспечения

1. ВВЕДЕНИЕ

В современных гидроакустических комплексах используется достаточно сложное ПО и алгоритмическое обеспечение, для которых необходимо проводить качественную сложную отладку в интересах уменьшения издержек при морской отработке и сокращения общего времени разработки системы, а также повышения качества ПО. Программное обеспечение характеризуется большим количеством программных модулей и разнообразными входными данными с существенными потоками информации. Для отладки ПО таких комплексов разрабатываются специальные стенды в состав которых включается имитационное ПО, решающее задачу формирования входных данных отлаживаемого ПО.

Условная схема такого стенда и размещённого на нём штатного ПО приведена на рисунке 1. На схеме показано включение имитационного ПО в штатное. При этом штатное ПО разбито на две группы:

- ПО оценки пространственно-частотного спектра, характеризующееся большим потоком входных данных ($\div 500 \dots 700$ Мб/с) и несколько меньшим выходных ($\div 50 \dots 100$ Мб/с). Данное ПО выполняется на специализированных процессорах по цифровой обработке сигналов, а входные данные для них формируются в камеральном режиме, выдача производится в реальном времени;
- ПО универсальных машин, выполняющее первичную и вторичную обработку информации, характеризующееся меньшими потоками информации,

но наличием сложных обратных связей и необходимостью полной имитации в реальном времени (невозможностью предварительного расчёта данных).

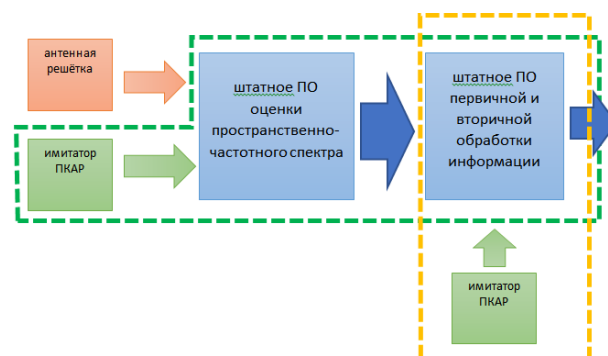


Рис. 1. Условная схема стенда отладки ПО.

При этом на рисунке 1 зелёной пунктирной линией показана схема включения при работе от имитатора ПКАР, а оранжевой от имитатора АПС. Возможны также варианты их совместного использования, когда часть режимов гидроакустического комплекса работает от имитатора ПКАР, а часть от имитатора АПС.

Для проведения отладки штатного ПО необходимо установить корректность формируемых входных данных. Таким образом возникает задача аттестации имитаторов аппаратно-программных средств (АПС) и приёмных каналов антенной решётки (ПКАР), о чём пойдёт речь ниже.

В рамках аттестации ставилась задача проверки необходимых характеристик имитаторов АПС и ПКАР. При этом для имитаторов АПС проверялись характеристики формирования данных, а именно временно диаграммы и соответствия величин областям допустимых значений.

В случае имитатор ПКАР производилась проверка качественных и количественных характеристик имитационных данных по выходам приёмных каналов антенны. Описание исследуемых имитаторов приводится в [1...3].

II. НОРМЫ, МЕТОДИКИ И ПРОГРАММА АТТЕСТАЦИИ

Проверка имитаторов АПС и ПКАР была разделена на две независимые методики. Типичные объёмы проверки приведены в [4].

Проверка имитации выходов АПС состоит из двух частей: проверки соответствия полей информационных модулей области допустимых значений и проверки временной диаграммы выдачи информационных данных (если их выдача носит периодический характер) в соответствии с таблицей Б.1.

Проверка АПС состоит в проверке временных характеристик выдачи блоков данных – информационных модулей и числовых значений их полей – единиц информации. Алгоритм проверки соответствия значений поля области допустимых значений описывается следующим выражением:

$$\begin{cases} g(i) = \text{"правда"}, \text{ если } a(i) \in [a_{low} \dots a_{high}]; \\ g(i) = \text{"ложь"}, \text{ если } a(i) \notin [a_{low} \dots a_{high}], \end{cases}$$

где g – логическая переменная, являющаяся результатом проверки текущего значения поля i -го информационного модуля, i – индекс текущего проверяемого информационного модуля, a – проверяемое значение поля, a_{low} – нижняя граница области допустимых значений, a_{high} – верхняя граница области допустимых значений. При этом область может задаваться и иными интервалами: $[a_{low} \dots a_{high})$, $(a_{low} \dots a_{high}]$, либо $(a_{low} \dots a_{high})$.

$$\begin{cases} G = \text{"правда"}, \text{ если } num(g(j) = \text{"ложь"}) \Big|_{j=[i, i-99]} \leq 1; \\ G = \text{"ложь"}, \text{ если } num(g(j) = \text{"ложь"}) \Big|_{j=[i, i-99]} > 1, \end{cases}$$

где G – результат проверки информационного модуля, $num(g(j))$ – функция, возвращающая количество элементов последовательности, равных заданному значению.

Алгоритм проверки временной диаграммы задаётся следующим выражением:

$$\begin{cases} g(i) = \text{"правда"}, \text{ если } t_{prev}(i) \in [0, 8T \dots 1, 2T]; \\ g(i) = \text{"ложь"}, \text{ если } t_{prev}(i) \notin [0, 8T \dots 1, 2T], \end{cases}$$

где $t_{prev}(i) = t(i) - t(i-1)$, t – время прихода информационного модуля, i – индекс текущего информацион-

ного модуля для которого определяется соблюдения временной диаграммы.

$$\begin{cases} G = \text{"правда"}, \text{ если } num(g(j) = \text{"ложь"}) \Big|_{j=[i, i-99]} \leq 1; \\ G = \text{"ложь"}, \text{ если } num(g(j) = \text{"ложь"}) \Big|_{j=[i, i-99]} > 1. \end{cases}$$

Экран программы для вышеописанных проверок приведён на рисунке 2. На рисунке даны пояснения к основным графическим элементам программы.

Проверка имитатора ПКАР строится на проверке частотных и пространственных (фазировки) характеристик временных последовательностей по выходам приёмных каналов антенной решётки и состоит из трёх частей, а именно, проверки:

- пространственного спектра;
- частотного спектра;
- многолучёвости распространения сигнала посредством взаимнокорреляционной функции.

Проверка пространственного спектра.

В соответствии с моделями Приложения Д формируется развёртка пространственного спектра на основе фазировочного вектора для зоны Фраунгофера:

$$\mathbf{V} = \frac{1}{\sqrt{n}} \begin{Bmatrix} v\{0\} \\ \dots \\ v\{n-1\} \end{Bmatrix},$$

где

$$v_{SR.Fraunhfr}(i_{SR}) = e^{i \left(\frac{2\pi f}{c} (e_{sgnl.du} \cdot r_{SR}(i_{SR})) \right)}, \text{ с – скорость звука}$$

в воде, $e_{sgnl.du} = \{\cos(\alpha)\sin(\beta); \sin(\alpha)\sin(\beta); \cos(\beta)\}$ – направление падения плоской волны, α – КУ на источник сигнала, $\beta = 0$ – угол места на источник сигнала, $r_{SR}(i_{SR})$ – вектор, задающий положения i -ого ГАП (выбирается для соответствующей антенны и описывается в Приложении Д), $f \in [f_{low} \dots f_{high}]$ – частота принимаемого сигнала, f_{low} , f_{high} – соответственно нижняя и верхняя частоты частотного диапазона соответствующей антенной решётки.



Рис. 1. Экран проверки временной диаграммы и допустимых значений

Для:

– набора $\{\alpha(i)\} \in [\alpha_{left} \dots \alpha_{right}]$, где α_{left} , α_{right} – соответственно левая и правая границы сектора обзора антенны (сетка формируется с шагом $0,5^\circ$) и

– множества частот $\{f(i)\} \in [f_{low} \dots f_{high}]$ с шагом 1 Гц

формируются узкополосные развёртки пространственного спектра мощности:

$$S_{NB}(\alpha, f) = \mathbf{X}^+ \mathbf{V} \mathbf{V}^+ \mathbf{X},$$

где $\mathbf{X}(f) = \{x_{spec}(f, i_{SR})\}^T$ – набор спектральных отсчётов для частоты f по всем датчикам антенной решётки, $x_{spec}(f, i_{SR}) = FFT\{x_{time}(i_{SR})\}_f$, $FFT\{\square\}$ – прямое преобразование Фурье.

После формируется широкополосный пеленгационный рельеф:

$$S_{WB}(\alpha) = \sum_i S_{NB}(\alpha, f(i))$$

По широкополосному сигнал, визуально определяются отклики гидроакустических сигналов.

Оценка КУ откликов на шумовые сигналы производится визуально с использованием средств MatLab.

Проверка частотного спектра.

Для проверки спектра шумящих источников для выбранного направления формируется спектр сигнала:

$$S_{spec}(f, i_{spec}) = S_{NB}(\alpha, f, i_{spec})|_{\alpha=\alpha_*},$$

где α_* – выбранный КУ, i_{spec} – порядковый индекс периода спектрального анализа.

Далее вычисляется временная последовательность:

$$T(i_{spec}) = IFFT\{S_{spec}(f, i_{spec})\},$$

где $IFFT\{\square\}$ – обратное преобразование Фурье.

На основе временной последовательности стандартными средствами MatLab строится периодограмма с перекрытием 50%.

Для спектрального анализа гидролокационных сигналов используется следующий подход. По выходам заборных приборов формируется временная последовательность:

$$x_{time,*} = \sum_{i_{SR}} x_{time}(i_{SR})$$

на основе которой стандартными средствами MatLab строится периодограмма с перекрытием 50%.

Оценка наличия ДС и параметров гидролокационных сигналов производится визуально с использованием средств MatLab.

Проверка многолучёвости посредством взаимнокорреляционной функции.

Для выбранного КУ строятся последовательности спектров как описано выше для двух углов места $\beta = 0^\circ$ и

$\beta = -10^\circ$: $S_{\text{spec.1}}(f, i_{\text{spec}})$ и $S_{\text{spec.2}}(f, i_{\text{spec}})$. На основе вычисляется взаимнокорреляционная функция:

$$C = \sum_{i_{\text{spec}}} \text{IFFT} \left\{ S_{\text{spec.1}}(f, i_{\text{spec}})^* S_{\text{spec.2}}(f, i_{\text{spec}}) \right\}$$

Оценка наличия ДС во взаимнокорреляционной функции производится визуально с использованием средств MatLab.

Вышеприведённые проверочные алгоритмы реализованы в виде программы MatLab, некоторые результаты работы которой будут приведены ниже.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АТТЕСТАЦИИ

В результате проведения аттестации были подтверждены требуемые характеристики имитаторов АПС и ПКАР. Дальнейшее успешное их использование подтвердило правильность выбора норм и построение методики аттестации.

Оценка точности в части соблюдения временной диаграммы в сводном виде приведена в табл. 1.

В табл. 2 и на рис. 3...5 приведены результаты, полученные в технологической программе и использованные для оценки корректности формирования курсовых углов на источники сигнала, дискретных составляющих в спектре источника и проверки качества имитации многолучевого распространения.

Таблица 1. Сводные результаты аттестации в части временной диаграммы имитатора АПС

Тип имитируемого средства	Максимальное отклонение от номинального темпа выдачи данных, %	
	минимальное	максимальное
пассивные пеленгаторы	3,00	15,0

Тип имитируемого средства	Максимальное отклонение от номинального темпа выдачи данных, %	
	минимальное	максимальное
гидролокатора	1,00	10,0
радиолокаторы	0,1	0,3
иные	1,0	1,0

Графики отражают соответственно:

- 1) развёртку широкополосной пеленгации;
- 2) развёртку узкополосной пеленгации;
- 3) взаимнокорреляционную функцию по одному курсовому углу для двух разнесённых в вертикальной плоскости пространственных каналов.

В табл. 2 приведены сводные данные по достигнутым количественным показателям качества имитационных данных.

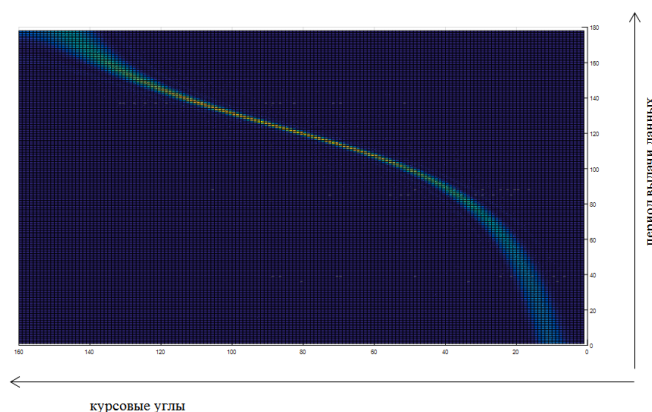


Рис. 2. Временная последовательность широкополосных развёрток для движущегося источника.

Таблица 2. Сводные результаты аттестации в части показателей качества имитатора ПКАР

Тип имитируемого средства	Точность формирования по курсовому углу, град.		Точность формирования дискретных составляющих в спектре, %	
	минимальная	максимальная	минимальная	максимальная
пассивные пеленгаторы	0,27	1,60	0,27	0,50
гидролокатора	0,31	0,75	0,10	1,90

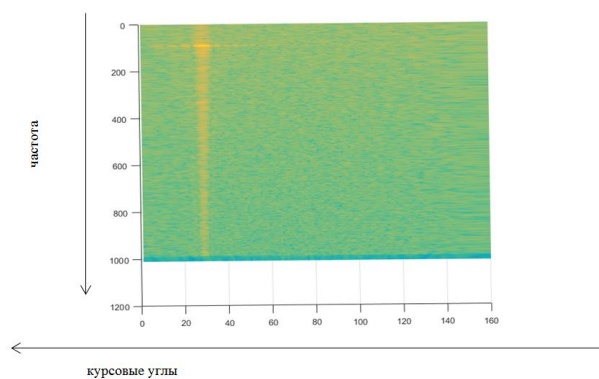


Рис. 3. Узкополосная развёртка.

- [2] Шафранюк А.В. Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – СПб.: ЛЕМА. – 2016. – С. 314-316.
- [3] Шафранюк А.В., Прокопович В.В., Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – СПб.: ЛЕМА. – 2018. – С. 585-588.
- [4] Шафранюк А.В., Грановский В.А., Прокопович В.В., Беляева В.В., Требования к синтезу моделей пассивных ГАС в связи с проблемой их аттестации // Материалы конференции «УМАС-2018». – 2018. – С. 367-375.

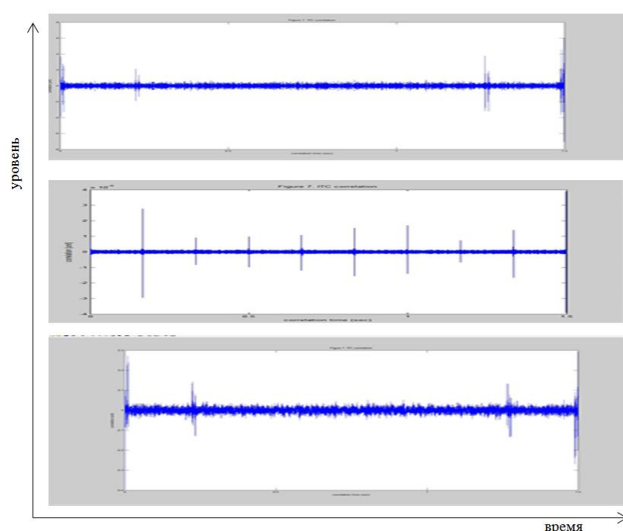


Рис. 4. Графики взаимнокорреляционных функций.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный в работе и реализованный в программе и методике аттестации подход позволил реализовать аттестацию имитационного ПО стенда и обеспечить необходимый уровень качества входных данных для задач отработки штатного ПО и алгоритмического обеспечения разрабатываемого гидроакустического комплекса. Собственно аттестация проводилась в соответствии с ГОСТ Р 8.568.

Благодарности

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-08-00082).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шафранюк А.В., Прокопович В.В., Подход к построению универсального имитационного программного обеспечения в интересах отработки технических и алгоритмических решений в гидроакустике // Материалы конференции «УМАС-2016». – 2016. – С. 257-266.

Разработка метода определения электрической поляризуемости частиц в жидкости

Г. В. Шувалов

ФГУП «Сибирский НИИ метрологии»,
г. Новосибирск, Россия,
e-mail: shuvalov@sniim.ru

М. В. Кручинина

НИИ терапии СО РАН,
г. Новосибирск, Россия,
e-mail: kruchmargo@yandex.ru

В. М. Генералов

ФБУН ГНЦ вирусологии и биотехнологии «Вектор»,
Роспотребнадзор
П. Кольцово НСО, Россия,
e-mail: general@vector.nsc.ru

И. В. Минин

ФГУП «Сибирский НИИ метрологии»,
г. Новосибирск, Россия,
e-mail: shuvalov@sniim.ru

Аннотация — Одним из эффективных способов экономии топлива является применение водотопливных эмульсий (ВТЭ). Важным фактором устойчивости ВТЭ является электрический заряд, образуемый на поверхности частиц водотопливной эмульсии. Способность частиц к образованию стойкого электрического заряда характеризуется величиной электрической поляризуемости частиц. В этой связи в статье рассмотрена разработка метода оценки электрической поляризуемости частиц.

Ключевые слова — электрическая поляризуемость частиц; диэлектрическая проницаемость; измерительная установка

I. ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов экономии топлива является применение водотопливных эмульсий (ВТЭ), использование которых не требует переделок двигателя, не вызывает необходимости изменения технологии подготовки топлива и не нуждается в больших капиталовложениях.

Кроме этого, важнейшим фактором устойчивости ВТЭ является электрический заряд, образуемый на поверхности частиц эмульсии. Способность частиц к образованию стойкого электрического заряда характеризуется величиной электрической поляризуемости частиц.

В этой связи разработка метода оценки стабильности ВТЭ, в том числе по величине электрической поляризуемости частиц является актуальной.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Под водотопливной эмульсией понимается специально приготовленная равномерная смесь мелко диспергированной пресной воды с очищенным топливом. Размеры частиц воды в такой эмульсии находятся в пределах 1-10 мкм. Чем качественнее ВТЭ, тем она устойчивее и тем медленнее разделяется на топливо и воду. Одной из причин, способствующих образованию устойчивых топливных эмульсий является присутствие в топливах смолистых веществ, нафтеновых кислот и их мыл. Образованные ими защитные пленки препятствуют сливанию отдельных

капель воды в более крупные, и, тем самым, предотвращают разрушение эмульсии и выделение капель воды из топлива.

Предлагается измерение коэффициента поляризуемости частиц осуществлять на специальной установке путем определения скорости частиц при ее поступательном движении в неоднородном переменном электрическом поле (НПЭП) при известных параметрах электрического поля в измерительной ячейке. В предлагаемой установке определение скорости частицы при ее поступательном движении осуществляется путем оптической регистрации траектории частицы в неоднородном переменном электрическом поле.

Метод предназначен для измерений величины объемной поляризуемости α_v частиц в диэлектрических жидкостях.

III. ОПИСАНИЕ МЕТОДА И УСТАНОВКИ

В основу метода положена следующая теоретическая модель. В вакууме в неоднородном электрическом поле (НПЭП) на единицу объема диэлектрика (не имеющего свободного электрического заряда) действует сила

$$\vec{F}_{эл} = \frac{\epsilon_0 \chi}{2} \vec{\nabla} E^2, \quad (1)$$

где χ_v – диэлектрическая восприимчивость частицы;

ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

E – напряженность электрического поля в вакууме.

В случае сферической частицы радиуса r эта сила определяется из выражения

$$\vec{F}_{эл} = \frac{\epsilon_0}{2} \chi_v \frac{4\pi r^3}{3} \vec{\nabla} E^2. \quad (2)$$

Если обозначить величину $\chi_v \frac{4\pi r^3}{3}$ как объемную поляризуемость a_v частицы, то для силы можно записать

$$\vec{F}_{эл} = \frac{\varepsilon_o}{2} \alpha_q \vec{\nabla} E^2. \quad (3)$$

В среде, которая по своим диэлектрическим свойствам отличается от вакуума, на частицу в НПЭП будет действовать сила

$$\vec{F}_{эл} = 2\pi \varepsilon_{cp} \varepsilon_o r_q^3 \left[\frac{\varepsilon_q - \varepsilon_{cp}}{\varepsilon_q + 2\varepsilon_{cp}} \right] \vec{\nabla} E^2, \quad (4)$$

где ε_q – относительная диэлектрическая проницаемость частицы;

ε_{cp} – относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\vec{\nabla} E^2$ – градиент квадрата напряженности электрического поля в среде (V^2/m^3).

В уравнении (4) величину $4\pi \varepsilon_{cp} \varepsilon_o r_q^3 \frac{\varepsilon_q - \varepsilon_{cp}}{\varepsilon_q + 2\varepsilon_{cp}}$ обозначим через a_q – объемную поляризуемость частицы в растворе сахарозы (0.3 М) и тогда сила, действующая на частицу в растворе сахарозы, будет равна

$$\vec{F}_{эл} = \frac{1}{2} \varepsilon_o \alpha_q \vec{\nabla} E^2. \quad (5)$$

С другой стороны, на частицу, движущуюся в вязкой среде со скоростью v_q , действует сила Стокса

$$\vec{F}_{cm} = 6\pi \eta_{cp} \cdot \vec{v}_q \cdot r_q. \quad (6)$$

Из решения уравнения $\vec{F}_{cm} = \vec{F}_{эл}$

$$\frac{1}{2} \varepsilon_o \alpha_q \vec{\nabla} E^2 = 6\pi \eta_{cp} \cdot \vec{v}_q \cdot r_q \quad (7)$$

находится искомая величина объемной поляризуемости частицы в растворе

$$\alpha_q = \frac{12 \cdot \pi \cdot \eta_{cp} \cdot r_q \cdot \vec{v}_q \cdot \vec{\nabla} E^2}{\varepsilon_o \cdot \vec{\nabla} E^2 \cdot \vec{\nabla} E^2}. \quad (8)$$

В соответствии с уравнением (8) для определения поляризуемости α_q частицы в выражение следует подставить величины:

r_q – радиус частицы;

ε_o – диэлектрическая постоянная;

η_{cp} – вязкость среды;

$\vec{v}_q$ – скорость поступательного движения частицы в НПЭП;

$\vec{\nabla} E^2$ – градиент квадрата напряженности электрического поля между электродами в измерительной ячейке.

Измерение поляризуемости осуществляется с помощью измерительного комплекса, который включает в себя следующие компоненты: компьютер; усилитель; генератор, интегрированный в компьютер; микроскоп с видеокамерой; одноразовую измерительную ячейку.

Функциональная схема измерительного комплекса представлена на рис. 1.

Генератор обеспечивает подачу переменного гармонического напряжения на вход усилителя с фиксированной частотой $f = 5 \cdot 10^5$ Гц.

Усилитель обеспечивает подачу действующего напряжения $U = 5$ В на электроды измерительной ячейки. Микроскоп используется для наблюдения за поведением частиц в измерительной камере.

Видеокамера обеспечивает визуализацию частицы и передачу данных видеоизображения в компьютер.

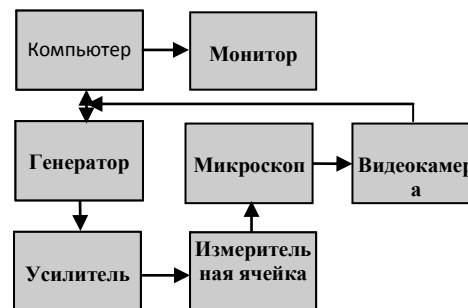


Рис. 1. Функциональная схема комплекса для измерений электрической поляризуемости частиц.

Методика измерений электрической поляризуемости должна включать в себя все необходимые сведения о принципе измерений и технических характеристиках измерительной установки, а также вспомогательных работах. Знание этих сведений необходимо для обеспечения полного использования технических возможностей методики, правильной эксплуатации измерительной установки, а также интерпретации результатов. Методика должна обеспечить измерения объемной поляризуемости частиц с погрешностью, не превышающей значений, приведенных в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПОЛЯРИЗУЕМОСТИ

Диапазон измерений поляризуемости α_q, m^3	Относительная погрешность измерений поляризуемости $\alpha_q, \%$
$+10^{-15} - 10^{-13}$	30

В Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (ФГУП «СНИИМ») был разработан опытный образец эталона электрической поляризуемости частиц, который можно использовать при калибровке установок для исследований ВТЭ [1]. Это позволит оперативно оценивать устойчивость ВТЭ для судовых двигателей, что актуально при создании и разработке способов стабилизации ВТЭ.

Одной из основных метрологических характеристик эталона является неопределенность измерений поляризуемости частиц. Ниже приводится оценка неопределенности измерений для опытного эталона.

Расчет неопределенностей измерений проводится в соответствии с РМГ 43-2001 «Руководство по выражению неопределенности измерений». Составляющими неопределенности результата измерения являются погрешности,

обусловленные стандартными неопределенностями, оцениваемые по типу А и В.

Стандартная неопределенность, обусловленная неисключенными систематическими погрешностями (НСП), оценивается по типу В (U_B). Стандартная неопределенность, обусловленная случайными погрешностями (СП), оценивается по типу А (U_A).

Стандартную неопределенность по типу В оценивают по формуле

$$U_B = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3}}, \quad (9)$$

где θ_i - составляющие погрешности.

Стандартную неопределенность результата единичного измерения по типу А оценивают по формуле

$$U_A = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}, \quad (10)$$

где n - количество наблюдений (измерений);

x_i - текущее значение измеряемого параметра;

x_{cp} - среднее значение измеряемого параметра.

На основании стандартных неопределенностей U_A и U_B проводят оценивание суммарной стандартной U_c и расширенной неопределенности U_p .

Суммарную стандартную неопределенность U_c вычисляют по формуле

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}. \quad (11)$$

Расширенную неопределенность U_p вычисляют по формуле

$$U_p = k \cdot \sqrt{U_A^2 + U_B^2}, \quad (12)$$

где k - коэффициент охвата.

Состав и назначение средств измерений и оборудования эталона для измерений уровня поляризуемости биологических частиц и клеток приведен в таблице 2.

Стандартная неопределенность по типу В (u_B , % отн.) составляет 14 %.

Стандартная неопределенность результата единичного измерения по типу А, оцененная по формуле (10) составляет 3 % отн.

Метрологические характеристики разработанного опытного образца эталона для измерений уровня поляризуемости биологических частиц приведены в таблице 3.

ТАБЛИЦА 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Наименование составной части эталона	Тип, марка	Назначение	Метрологическая характеристика
Усилитель	ГЗ -112/1	Обеспечивает напряжение $U=5$	Погрешность, %: $+(2+30 \cdot f_n)$

		В на электроды измерительной ячейки	где f_n - частота
Генератор	ГСПФ -052	Обеспечивает подачу переменного напряжения на вход усилителя	Погрешность - 0,01%
Вольтметр	B7-37	Измерение напряжения на измерительной ячейке	Погрешность измерения, %: $\pm 1,5$
Частотомер	ЧЗ-64	Измерение частоты на измерительной ячейке	Погрешность, %: $\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$
Комплекс визуализации	МС-14	Обеспечивает визуализацию частицы	Размер пиксела 1.4x1.4 мкм
Вискозиметр капиллярный	ВПЖ-4		Погрешность - $\pm 0,3$ %
Микроскоп МИКМЕД-6	МИКМЕД-6	Используется для измерения радиуса частицы r_q	Погрешность, $\pm(1,4+L/100)$ L- размер в мм
Измерительная ячейка		Для проведения диэлектрофореза частиц	Погрешность не хуже 0.5 мкм

ТАБЛИЦА 3. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРАБОТАННОГО ЭТАЛОНА

Наименование характеристики	Значение
Диапазон измерения объемной поляризуемости, m^3	от 10^{-14} до 10^{-16}
Стандартная неопределенность по типу А, u_A , % отн.	3
Стандартная неопределенность по типу В, u_B , % отн.	14
Суммарная стандартная неопределенность, u_c , % отн.	15
Расширенная неопределенность, U_p , % отн. ($k=2$)	25

Общий вид опытного образца эталона приведен на рис. 2.

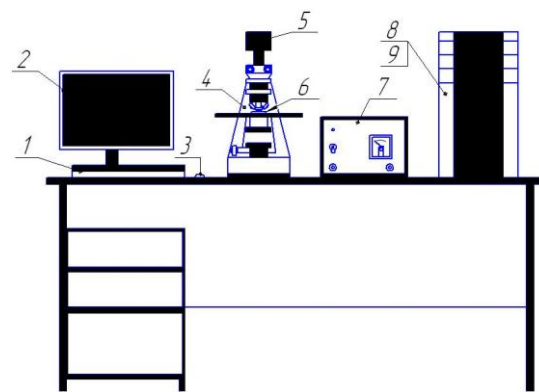


Рис. 2. Общий вид опытного образца эталона

В состав опытного образца эталона для измерений уровня поляризуемости биологических частиц и клеток эритроцитов входят следующие основные элементы:

- измерительная ячейка;

- генератор напряжения;
- вольтметр переменного тока;
- микроскоп;
- видеокамера;
- компьютер;
- монитор;
- пакет программного обеспечения для управления работой эталона.

Общий вид опытного образца с установленной измерительной ячейкой приведен на рис. 3, 4.



Рис.3. Общий вид опытного образца

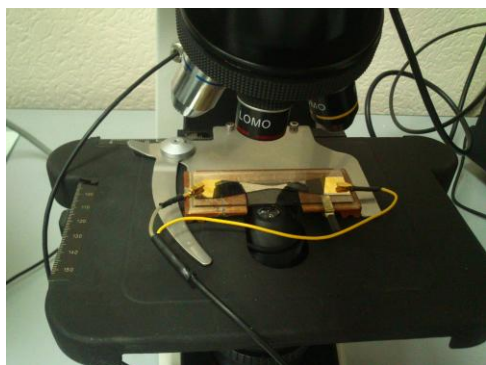


Рис.4. Общий вид опытного образца с установленной измерительной ячейкой

V. Выводы и заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований разработанная установка для определения электрической поляризуемости частиц в жидкости и проведена оценка неопределенности измерений для опытного образца эталона электрической поляризуемости частиц водотопливных эмульсий, что дает возможность осуществлять калибровку установок для исследований эмульсий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шувалов Г.В. Разработка эталона электрической поляризуемости частиц водотопливных эмульсий/ Г.В.Шувалов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2015. -№4.- С.183-185.

Методика оценивания параметров расположения контрольного элемента стенда качки

В. Е. Киреенков, А. М. Мягков, Н. Л. Яворовская, О. А. Яковенко
 АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
 Санкт-Петербург, Россия
 т.+7(812) 499-83-37, ф.+7(812) 499-81-53,
 office@eprib.ru

Аннотация — В докладе рассмотрен вопрос об аттестации имитаторов движения в целом, а также, более подробно, - задача оценивания параметров расположения контрольного элемента стенда качки, как одна из наиболее значимых в ходе эксплуатации стенда при проведении калибровки и испытаний навигационной аппаратуры. Предложена методика оценивания параметров расположения контрольного элемента, приведены материалы анализа предельных отклонений и полученные результаты оценивания.

Ключевые слова - аттестация испытательного оборудования, имитаторы движения, оценивание параметров расположения

I. ВВЕДЕНИЕ

Наиболее востребованным и значимым видом испытательного оборудования в области разработки, производства и ремонта навигационных приборов являются имитаторы движения, в первую очередь стенды для воспроизведения периодических угловых движений, позволяющие имитировать бортовую и килевую качку, рысканье, а также выполнять угловое позиционирование и наклоны.

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 широкой номенклатуры видов испытательного оборудования. В области аттестации имитаторов движения наша организация имеет опыт работы с серийным оборудованием большого количества иностранных и отечественных производителей [1]. Помимо серийно выпускаемых стендов есть и специально разрабатываемые для оценивания отдельных характеристик конкретных изделий.

К основным аттестуемым характеристикам указанного вида оборудования относятся:

- погрешность и повторяемость воспроизведения угла;
- погрешность и стабильность задания угловой скорости вращения за оборот;
- неортогональность осей;

- отклонение от перпендикулярности контрольного элемента (далее – КЭ) относительно оси вращения стенда (при наличии конструктивного КЭ).

Последний параметр обеспечивает решение задачи определения точного азимута оси стенда, а также задачу привязки навигационных приборов при проведении калибровки и испытаний [2]. Указанная задача является одной из ключевых задач, поэтому от точности выставки КЭ в конечном итоге зависит и точность навигационной аппаратуры. Это объясняет высокие требования, предъявляемые к параметрам расположения КЭ.

В настоящем докладе рассмотрена задача оценивания параметров расположения КЭ стенда имитации качки и рыскания.

II. ОПИСАНИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕНДА

Рассматриваемый стенд, предназначенный для задания механических воздействий (качки, рыскания и наклона) при проведении калибровки и испытаний гироскопического прибора (далее - прибор ГП), разработан и изготовлен в ЦНИИ «Электроприбор» и обеспечивает средний ремонт приборов ГП. КЭ является конструктивной частью стенда (расположен на платформе стенда) и используется для определения азимута оси стенда перед проведением калибровки и испытаний прибора ГП. Основные технические характеристики стенда:

- диапазон воспроизведения угла курса от 264 до 360° и от 0 до 94°;
- диапазоны воспроизведения углов бортовой и килевой качки от минус 35 до 35°;
- погрешность воспроизведения углов в пределах $\pm 6'$;
- погрешность воспроизведения амплитуд периодических воздействий в пределах $\pm 20'$;
- отклонение от перпендикулярности КЭ относительно оси вращения стенда не более 15".

III. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДИКИ

Применяемая ранее методика определения азимута оси вращения стенда предусматривает использование КЭ (зеркала), расположенного непосредственно на оси вращения стенда и выставленного перпендикулярно к ней.

Указанное зеркало имеет возможность выставки и является съемным элементом оснастки. Вращая стенд, выставляют зеркало с помощью автоколлиматора таким образом, чтобы торцевое биение не превышало 2". В данном случае была реализована другая схема расположения КЭ (не на оси вращения), что привело к необходимости разработки новой методики оценивания параметров расположения КЭ.

В соответствии с разработанной методикой для оценивания параметров расположения КЭ используются три теодолита 3Т2КА: два из них определяют направления на КЭ при повороте платформы вокруг оси в два симметричных положения, а третий задает направление базового КЭ, расположенного на несущей конструкции здания. Определение азимута КЭ в двух симметричных положениях оси вращения стенда позволяет оценить отклонение от перпендикулярности КЭ относительно оси вращения стенда. На рисунке 1 приведена схема измерений.

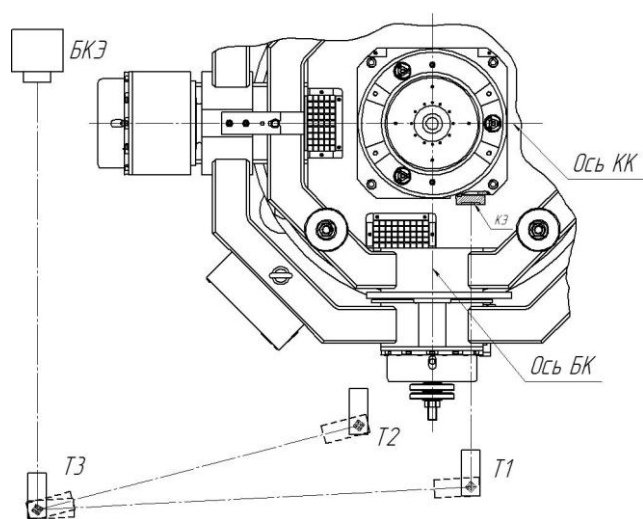


Рис. 1 Схема измерений

(БКЭ – базовый контрольный элемент; КЭ – контрольный элемент; Т1, Т2, Т3 – теодолиты 3Т2КА; Ось БК – ось бортовой качки стенда; Ось КК – ось килевой качки стенда)

IV. АНАЛИЗ ПРЕДЕЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ

В докладе приведены материалы анализа предельных отклонений в соответствии с КД на платформу качек (отклонение от перпендикулярности КЭ относительно оси вращения в горизонтальном направлении 15"). Анализ был выполнен в среде ProEngineer и позволил определить допуск на разность азимутов КЭ в двух симметричных положениях стенда (рисунок 2), соответствующий отклонению от перпендикулярности КЭ относительно оси вращения стенда 15".

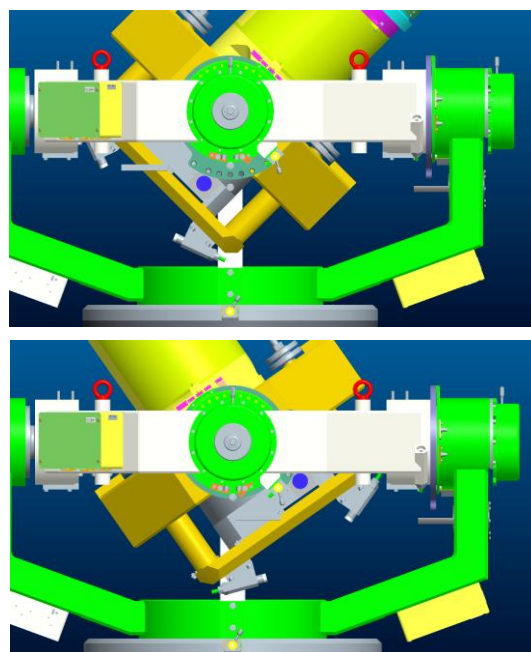


Рис. 2 Симметричные положения оси вращения стенда при проведении оценивания параметров расположения КЭ

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ МЕТОДИКИ

Разработанная методика оценивания параметров расположения КЭ позволила выставить КЭ относительно оси вращения стенда в соответствии с требованиями КД в пределах $\pm 15''$.

Благодарности

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-08-00801).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гороховский К. С., Яворовская Н. Л., Яковенко О. А., Опыт аттестации высокоточных имитаторов движения, Сборник тезисов Шестой Всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (Судометрика 2016)», 10–13 октября 2016 г., Санкт-Петербург, 2016. стр. 125-127.
- [2] Иванов В. А., Метрологическое обеспечение гироскопов. – Л. Судостроение, 1983. – 180 стр.

Метрологические аспекты измерений уровня пульсаций в источниках питания постоянного тока

К. А. Бондин, А. А. Зуйков, С. И. Липатов
 ООО «Профигрупп»
 г. Санкт-Петербург, Россия
 тел (812) 702-12-05 e-mail: bondin@pg-spb.ru

Аннотация – Рассмотрена проблема контроля параметра пульсаций в источниках питания постоянного тока. Зафиксировано наличие в нормативной документации множества методик выполнения измерений для одного и того же контролируемого параметра. Проведен анализ метрологических проблем возникающих при реализации существующих методик выполнения измерений. Предложен единственный вариант методики выполнения измерений и его техническая реализация.

Ключевые слова – пульсация, источники питания

I. ВВЕДЕНИЕ

Каждое техническое средство обладает уникальными техническими параметрами. Промышленностью выработаны методы по контролю параметров и подтверждению их соответствия требованиям: испытания, проверки, калибровки, поверки. Разработаны системы качества, программы постановки на производство и прочие регламенты, управляющие процессом выпуска продукции с требуемыми характеристиками.

На данный момент в отношении типовых агрегатов выпускаемых технических средств разработаны стандартные методы контроля (измерений) их параметров, которые зафиксированы в стандартах и конструкторской документации с достаточной степенью детализации. Они актуализируются по мере необходимости, в связи с появлением новых измерительных технологий и средств измерений.

Производя типовое техническое средство, такое как источник питания постоянного тока, мы в ООО «Профигрупп» были полностью уверены, что все методики измерений контролируемых параметров стандартизованы, освоены многими пользователями и практически совершенны в методологическом плане. Практическая деятельность по выпуску продукции заставила нас усомниться в этом.

Примером, подтверждающим сомнения, стал такой параметр источника питания как уровень пульсаций выходного электрического тока. Этот параметр активно применяется при нормировании технических характеристик источников питания. Методология его контроля, представленная ниже, проста как в техническом отношении, так и в практической реализации.

II. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ ПУЛЬСАЦИЙ ВЫХОДНОГО ТОКА [1]

Определение пульсаций выходного тока проводят методом косвенных измерений путем измерений падения напряжения на нагрузке с помощью микровольтметра переменного напряжения ВЗ-57. Определение погрешности источника производится при максимальном выходном токе и напряжении, равном 90% от предела диапазона измерений.

Методика измерений уровня пульсаций реализуется в следующем порядке:

- Подключить к выходу поверяемого источника катушку электрического сопротивления Р310, Р321 (в зависимости от выходного тока источника);
- К потенциальным зажимам катушки подключить микровольтметр ВЗ-57;
- Органами управления поверяемого источника установить выходное напряжение, соответствующее 90% от предела диапазона измерений;
- Используя эталонную нагрузку, ограничить силу тока (N3300), с помощью органов управления поверяемого источника установить на выходе максимальный ток;
- Произвести измерения пульсаций напряжения, фиксируя показания микровольтметра ВЗ-57;
- За результат измерения принять значение, рассчитанное по формуле:

$$I_{\sim} = U_{изм} / R_{изм} \quad (1)$$

- где $U_{изм}$ – уровень пульсаций напряжения, измеренный микровольтметром ВЗ-57; $R_{изм}$ – номинальное значение сопротивления катушки, Ом.

Источник считается прошедшим поверку по данному пункту, если среднеквадратический уровень пульсаций выходного тока в режиме стабилизации тока не превышает 5 мА.

Реализация данной методики различными пользователями, при, казалось бы, широком поле допуска, показал очень большой разброс результатов измерений указанного параметра, выходящих за пределы допуска в десятки раз.

Несложное исследование данного метода измерений показало интересные результаты: Применение при контроле пульсаций катушки сопротивлений P310 с двумя номинальными сопротивлениями - 0,01 и 0,001 Ом показали изменения уровня пульсаций при использовании одного и того же режима работы источника питания в 1000 раз, хотя по закону Ома они должны были отличаться не более чем в 10 раз. Опыты с использованием катушки P323 с номинальным сопротивлением 0,0001 Ом подтвердили подобную тенденцию и показали полную несостоятельность данного метода измерений.

Анализ стандартизированных по ГОСТ 18953— 73 [2] методов измерений пульсаций показал, что применять данный метод нельзя. В то же время на практике метод измерений с помощью осциллографа практически не применяется в утвержденных методиках поверки. В настоящий момент стандарт [2] отменен и вместо него введен международный документ ГОСТ Р 54364-2011 (IEC 61204:2001) [3], который регламентирует новые методы контроля пульсаций:

- дифференциальный метод измерений;
- метод испытаний нагрузочной вилкой.

Практическое применение указанных методов вызвало больше новых вопросов, чем решенных ими: при использовании данных методов не удалось зафиксировать какие-либо критические уровни пульсаций. Иными словами, любой выпускаемый сегодня источник питания гарантированно не имеет критических уровней пульсаций.

Анализ методик измерений, используемых другими производителями, в том числе зарубежными, выявил многообразие применяемых методов. В зависимости от технического исполнения и мощности источника питания разнятся и методы контроля данного параметра:

- при помощи осциллографа с закрытым входом;
- с включением в измерительную цепь источника питания обратной полярности;
- при помощи дифференциальных пробников;
- с применением нагрузочных вилок и токовых клещей;
- с применением токовых шунтов и электронных нагрузок [4];
- с использованием ферритовых колец в измерительной схеме;
- путем снятия показаний непосредственно с нагрузочных сопротивлений.

Анализ привел к выводу, что пульсации постоянного тока - это характеристика стабилизатора источника питания в режиме стабилизации тока. Пульсации тока выражены безразмерной величиной, зависящей от режима работы источника питания и номинального уровня генерируемого постоянного тока.

Анализ составляющих формулы (1) показывает, что уровень постоянного и переменного тока напрямую зависит от нагрузки, на которую работает источник питания, точнее, от разности величины одной и той же нагрузки

для постоянного и переменного тока (активной и реактивной составляющей).

Так как при производстве универсальных источников питания нет информации о специфике будущей рабочей нагрузки, то при настройке и регулировке используется нагрузка, характеризующаяся в большей части активной составляющей. Логично выглядит идея, что и при проведении контрольных операций с источником питания следует применять аналогичную нагрузку: имеющую активную составляющую.

Анализ методов контроля пульсаций показывает активное применение электронных нагрузок. Функционал данных устройств безусловно удобен для воспроизведения необходимых режимов работы источников питания. Но для контроля параметров пульсаций источников питания критичным параметром становятся собственные пульсации и стабильность работы электронных нагрузок, которые в должном объеме никто не исследовал. Поэтому применение в методиках контроля пульсаций данных устройств по нашему мнению **не приемлемо**.

В процессе производства источников питания, для контроля технических параметров, нами было разработано устройство максимально учитывающее специфику измерительной задачи: Реостат электронноуправляемый (РЭУ-03) технические характеристики представлены в таблице.



Рис.1. Реостат электронноуправляемый (РЭУ-03)

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РЭУ-03

Наименование параметра	Значение параметра
1 Питание прибора	От сети 220 В, 50 Гц
2 Напряжение на нагрузке низковольтный вход высоковольтный вход	0 - 75 В 0 – 300 В
3 Максимально допустимое напряжение на низковольтном входе	85 В
4 Максимально допустимое напряжение на высоковольтном входе	400 В
5 Ток в нагрузке	0,001 – 20 А
6 Диапазон нагрузки	0,09 – 3000 Ом
7 Допускаемое отклонение от номинального значения нагрузки	8 %

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 1. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И
ХАРАКТЕРИСТИКИ РЭУ-03

Наименование параметра		Значение параметра
8	Допускаемая мощность рассеивания	0 – 490 Вт
9	Потребляемая мощность	Не более 25 ВА
10	Время установления рабочего режима не более	1 мин
11	Масса, не более, кг	18

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ нормативных документов и методик измерений параметров пульсаций в источниках постоянного тока позволил решить задачу установления единообразия в области контроля пульсаций.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Источники питания серии SM3300 и SM6000. Методика поверки РТ-МП-2437-551-2015
- [2] ГОСТ 18953— 73 Источники питания электрические ГСП. Общие технические условия.
- [3] ГОСТ Р 54364-2011 (IEC 61204:2001) "Низковольтные источники питания постоянного тока. Эксплуатационные характеристики"
- [4] Источники питания постоянного тока Agilent серии 66XXX. Методика поверки МП-080/447-2008

О возможности использования высокоточного инновационного датчика угла для контроля электромеханических призм

Ю. Л. Аванесов, В. В. Беляева, А. С. Воронов,
К. С. Гороховский, В. А. Грановский
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
г. Санкт-Петербург
vgranovsky@eprib.ru

Аннотация — с целью уменьшения трудоемкости работ по регулировке и контролю электромеханических призм сконструировано и испытано поворотное устройство на основе высокоточного инновационного датчика угла.

Ключевые слова — *призма, инновационный датчик угла, контроль характеристик, рабочее место.*

I. ВВЕДЕНИЕ

В процессе производства электромеханических призм, используемых в навигационных приборах для преобразования угла, происходят многократные измерения их характеристик. Особо трудоемкими и сложными являются измерения погрешности преобразования угла. Наиболее часто для данных целей используют оптическую делительную головку, главным эксплуатационным недостатком которой является высокая трудоемкость измерений, связанная с механическим приводом. С целью уменьшения времени проведения измерений и повышения точности разработано устройство для производственного контроля точности электромеханических призм, центральным элементом которого служит высокоточный инновационный датчик угла – измеритель угла цифровой ОПТРО-ДУ-АПИ-041 (далее ДУ) [1].

Паспортизированные технические характеристики ДУ представлены в таблице 1.

Основные элементы ДУ:

- измерительная марка;
- осветитель;
- фотоприемное устройство (на основе цифровой фотокамеры);
- устройство управления, сбора и обработки информации.

ТАБЛИЦА 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДУ

Наименование параметра	Значение
Дискретность выходных данных, не более	0,01"
Диапазон измерений	от 0° до 360°
Предел погрешности измерений угла	3,5"
Время получения одного отсчета, не более, с	30
Нестабильность от пуска к пуску, не более	1"

Принцип действия ДУ основан на анализе поворота изображения измерительной марки (жестко связанной с подвижной частью устройства) относительно координат

светочувствительной матрицы фотоприёмного устройства (жестко связанной с неподвижной частью устройства).

Измерительная марка представляет собой двумерное множество элементов (каждый из которых имеет форму круга), расположенных в виде ортогональной решетки с относительной яркостью 1 на фоне с относительной яркостью 0 (рис. 1). Для фиксации начального углового положения марки в ее центральной части имеются три круга увеличенного диаметра, образующие треугольник. Изображение треугольника на светочувствительной матрице фотоприемного устройства, в начальном угловом положении, определяет условную нулевую отметку угловой шкалы ДУ.

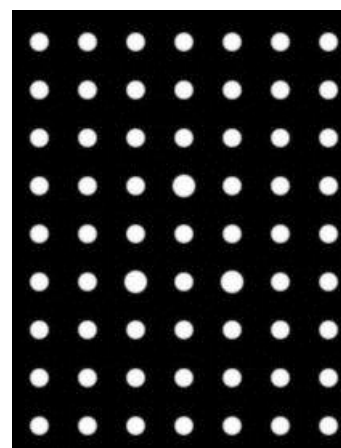


Рис. 1. Центральная часть измерительной марки с тремя увеличенными кругами

Все процедуры измерений автоматизированы с помощью программного обеспечения, которое позволяет: получать изображение с фотоприемного устройства; обрабатывать изображение; определять угловое положение измерительной марки относительно фотоприемного устройства, устанавливать параметры работы фотоприемного устройства.

II. ПРОВЕРКА ДАТЧИКА УГЛА

Для проверки заявленных точностных характеристик ДУ были проведены три серии измерений, в которых ДУ вместе с 36-гранной кварцевой призмой были закреплены на углозадающем устройстве ОДГЭ-5. Погрешность ДУ

определялась как разность между его показаниями и углами между соответствующими гранями призмы с учетом поправок, указанных в свидетельстве о поверке. Результаты проверки представлены на рис. 2.

В ходе проверки были подтверждены точностные характеристики ДУ и установлено, что обязательным условием для корректной работы ДУ является начальная выдержка во включенном состоянии, занимающая не менее 1,5 ч. За это время происходит стабилизация (по видимому, имеющая тепловую природу) процессов в устройстве и показания датчика устанавливаются в требуемых пределах (см. рис. 3).

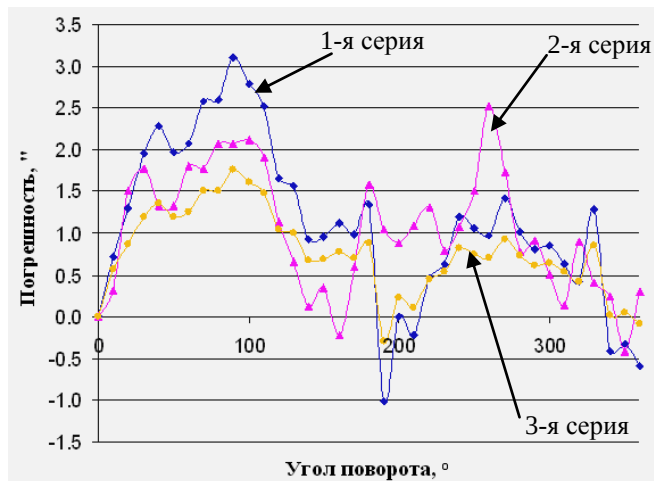


Рис. 2. Результаты проверки точностных характеристик ДУ

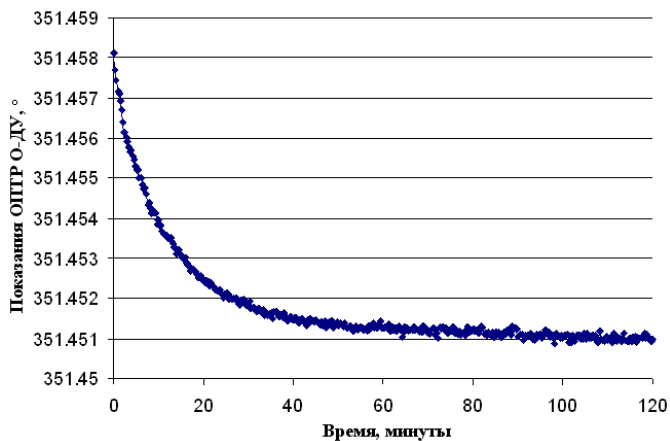


Рис. 3. Установление показаний ДУ в процессе начальной выдержки

Точностные характеристики ДУ также были подтверждены в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» на углоизмерительном преобразователе УП1-Ц № 001, входящем в состав эталонной поворотной установки ЭУП-3.

III. КОНСТРУКЦИЯ УСТРОЙСТВА

Разработанное устройство состоит из следующих элементов (рис. 4):

- ДУ (1);
- вращающаяся платформа (2);
- неподвижный корпус (3);
- шаговый двигатель типа FL42STH38 (4);
- система управления шаговым двигателем (5).

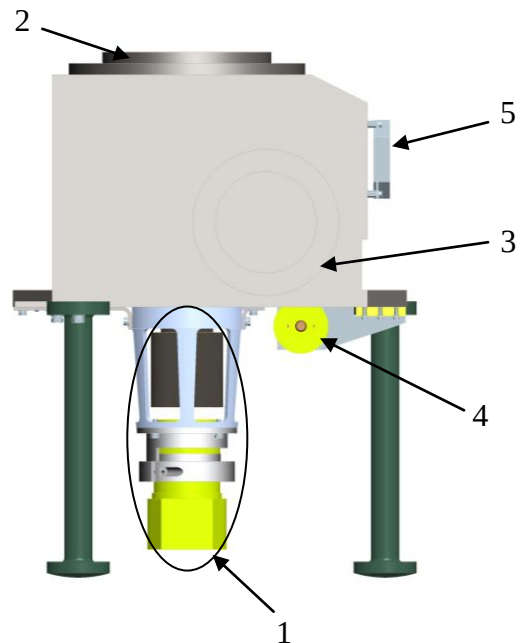


Рис. 4. Состав устройства

Для измерений погрешности преобразования угла электромеханической призмы, проверяемое изделие фиксируется на вращающейся платформе. С помощью шагового двигателя, по командам системы управления, задается угловое положение платформы, которое измеряется ДУ и электромеханической призмой. Погрешности преобразования угла определяется как разность показаний ДУ и электромеханической призмы.

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА

Определение точностных характеристик устройства состояло из нескольких этапов:

1) *Измерения времени готовности к работе после включения питания.* В ходе данной проверки с помощью ДУ фиксировалось одно и то же угловое положение вращающейся платформы с интервалом 5 с. Результаты измерений показали регулярное изменение фиксируемого угла от исходного уровня до установившегося уровня, который затем сохраняется в пределах нормы на погрешность ДУ (см. рис. 5). Таким образом, подтверждены результаты предварительных исследований ДУ (рис. 3), выявившие необходимость выдержки датчика перед его применением.

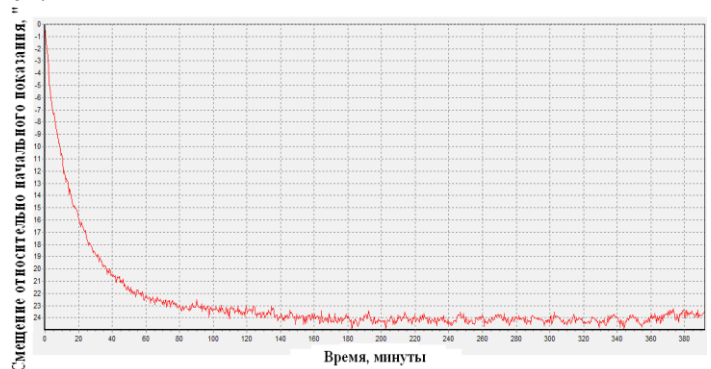


Рис. 5. Результаты измерений в процессе начальной выдержки во включенном состоянии

2) Проверка воспроизводимости показаний при возврате в начальное положение. Вращающаяся платформа устанавливалась в начальное положение, определяемое нулевым показанием автоколлиматора при направлении на одну из граней призмы. В данном положении фиксировалось показание ДУ, которое принималось за начальный отсчет. После чего совершался поворот платформы, как по часовой, так и против часовой стрелки, на угол не более 15° , после чего платформу возвращали в начальное положение. Контроль воспроизводимости осуществлялся по показаниям автоколлиматора.

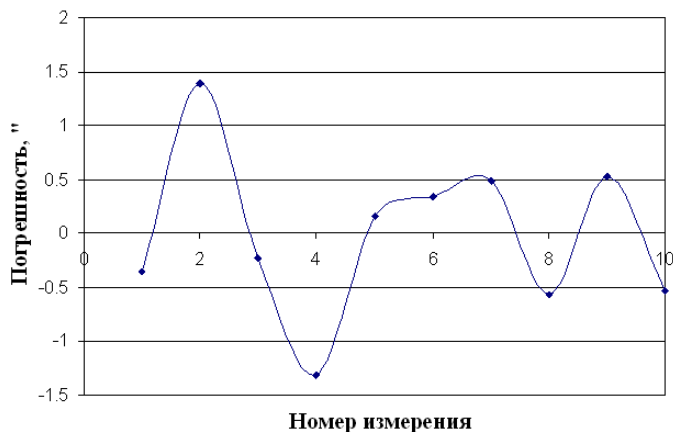


Рис. 6. Результаты проверки воспроизводимости показаний при возврате в начальное положение

На рис. 6 видно, что воспроизводимость показаний (модуль отклонения) находится в пределах $1,5''$.

3) Определение погрешности измерения углов. В начальном положении регистрировались показания ДУ и фиксировался ноль на автоколлиматоре. После чего осуществлялся поворот платформы на угол, близкий к углу между гранями призмы, и регистрировались показания ДУ и автоколлиматора. Погрешность измерения углов определялась как разность показаний ДУ и углов между гранями призмы, с учетом поправок, указанных в свидетельстве о поверке призмы.

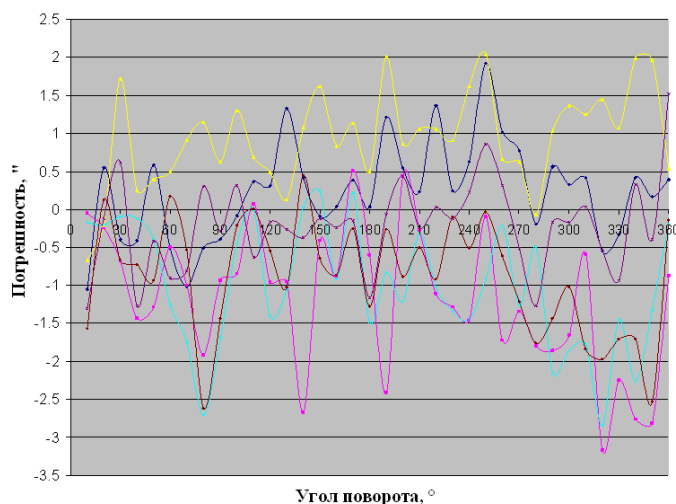


Рис. 7. Результаты определения погрешности измерений углов

На рис. 7 представлены результаты шести серий измерений погрешности. Измерения проводились через 10° на полном обороте. Каждая из серий начинается на одной и той же грани призмы. Видно, что имеет место некоторый разброс средних, относительно которых рассеяние реализаций случайной составляющей различается несущественно.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований определены следующие основные характеристики разработанного устройства:

- 1) время начальной выдержки во включенном состоянии – не более 1,5 ч;
- 2) воспроизводимость показаний в пределах $1,5''$;
- 3) предел инструментальной погрешности измерения углов не более $2''$ (по модулю).

Эти результаты позволяют говорить о возможности использования поворотного стенда для регулировки и контроля электромеханических призм.

Благодарности

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-08-00082).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. Н. Королев, А. Я. Лукин, Г. С. Полищук, "Новая концепция измерения угла. Модельные и экспериментальные исследования", Оптический журнал, 2012, том 79, № 6, 52-58.

КАЛИБРОВКА

Межлабораторные сличения как способ контроля качества метрологических работ на предприятии

А. С. Кривов
АО «НПФ «Диполь»
г. Москва, Россия
ask@dipaul.ru

Е. А. Смирнова
АО «НПФ «Диполь»
г. Москва, Россия
Smirnova EA@dipaul.ru

Аннотация — Рассмотрены основные задачи, решаемые при межлабораторных сличениях метрологических лабораторий по действующим стандартам. С учетом результатов двух пилотных раундов сличений результатов калибровки электроизмерительных приборов оценены перспективы развития работ по сличениям метрологических лабораторий промышленных предприятий. Показано место межлабораторных сличений в современной прикладной метрологии.

Ключевые слова — межлабораторные сличения, неопределенность результата калибровки, статистический показатель оценки участника, провайдер, референтная лаборатория

I. ВВЕДЕНИЕ

В структуре современных предприятий промышленности, транспорта, связи и других сфер экономики функционируют подразделения, основными задачами которых является определение количественных показателей материалов и веществ, параметров продукции на всех стадиях создания и технологических систем, а также оценки состояния и пригодности измерительного, контрольного и испытательного оборудования. В соответствии с требованиями к менеджменту качества компетентность таких подразделений должна удовлетворять требованиям стандарта ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 [1]. Одним из общих требований к качеству результатов метрологических и испытательных работ является проведение межлабораторных сравнительных испытаний (МСИ), которое нашло отражение в критериях аккредитации в Национальной системе аккредитации [2]. В настоящем докладе рассмотрены вопросы реализации указанного требования применительно к метрологическим лабораториям предприятий, занимающимся поверкой и калибровкой измерительных и контрольных приборов и систем. На примере результатов пилотного проекта по межлабораторным сличениям результатов калибровки электроизмерительных приборов, выполненного специалистами группы компаний ДИПОЛЬ [3], выполнен анализ целесообразности проведения МСИ метрологических лабораторий, области распространения МСИ и предложены рекомендации по развитию этого вида метрологической деятельности.

В большинстве зарубежных стран МСИ активно используется в калибровочных лабораториях в силу возможности получения объективных данных по экспериментальной проверке лабораторий, позволяющих выявить опасные ситуации и выполнить корректирующие действия. Даже в аккредитованной поверочной или калибровочной лаборатории могут иметь место неучитываемые

факторы, которые приводят к ошибочным результатам. Правила организации и проведения проверки квалификации лабораторий на основе МСИ отражены в ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 [4], а статистическому анализу посвящен ГОСТ Р ИСО 13528-2010 [5], который с текущего года будет заменен на ГОСТ Р 50779.60-2017 (ИСО 13528:2015) [6]. Анализ результатов проведенных МСИ для калибровки электроприборов был ориентирован на оценку места и роли сличений в прикладной метрологии. Отсутствие опыта проведения МСИ для отечественных метрологических лабораторий по большинству видов измерений определило пилотный характер двух раундов сличений.

II. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПИЛОТНЫХ РАУНДОВ МСИ

В группу участников межлабораторных сличений входили метрологические лаборатории 7 крупных предприятий, аккредитованные или готовящиеся к аккредитации в области поверки и калибровки средств измерений. Для проведения сличений была использована стандартная последовательная программа калибровки контрольного образца в лабораториях с контролем стабильности характеристик приборов в референтной лаборатории. В качестве референтной лаборатории была выбрана аккредитованная лаборатория ООО «Профигрупп».

Контрольными образцами для проведения сличений были выбраны широко применяемые в промышленности электроизмерительные приборы: цифровой мультиметр типа 34401A фирмы Keysight и комбинированный прибор типа Ц4352. Сличения результатов калибровки этих приборов проводились по измерениям напряжения и силы постоянного и переменного тока. Для цифрового мультиметра также проводились измерения по электрическому сопротивлению и частоте. По мнению организаторов сличений такой выбор контрольных образцов позволил в пилотном проекте не отвлекаться на изучение применяемых приборов, получить большой массив экспериментальных данных, сравнить результаты оценки квалификации для приборов с различным уровнем конструктивной сложности и показателей точности.

Статистический анализ данных включал в себя следующие процедуры:

- установление приписанных значений погрешности измерений и значений их расширенной неопределенности;
- расчет статистических показателей результатов сличений для каждого участника;

- интерпретация статистических показателей для оценки результатов участников.

В качестве приписанных значений использовались значения, полученные при калибровке контрольных образцов в референтной лаборатории с помощью многофункционального калибратора Fluke 5522A, аттестованного в качестве эталона единиц электрических величин. Контрольные точки определяются методиками калибровки, разработанными провайдером сличений. Определение значений расширенной неопределенности приписанных значений также осуществлялось по методикам калибровки.

В качестве статистического показателя для оценки результатов участников выбран показатель E_n по пункту 7.5 ГОСТ Р ИСО 13528-2010. Для каждого окончательного результата измерения значение E_n рассчитывается по формуле:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

где:

x – значение, определенное в лаборатории участника;

X – приписанное значение, определенное в экспертной лаборатории;

U_{ref} – расширенная неопределенность X ;

U_{lab} – расширенная неопределенность результата участника x .

При оценивании показателя E_n установлены следующие уровни оценки:

если $|E_n| \leq 1$ – результат лаборатории-участника признается удовлетворительным;

если $|E_n| \geq 1$ – результат лаборатории-участника признается неудовлетворительным.

Пилотный проект выполнен в полном соответствии с требованиями ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 и результаты представлены в докладе [3]. В каждой из участвующих в сличениях лабораториях были проведены серии измерений в 40 точках для мультиметра и 175 точках – для стрелочного прибора. Большинство графиков имеет вид, аналогичный представленному на следующих рисунках.

Отчеты по каждому из двух раундов МСИ содержат большое количество таблиц и графиков и экспертную оценку полученных результатов каждого участника, сделан вывод о возможных причинах неудовлетворительных результатов.

Все участники МСИ подтвердили свою квалификацию в подавляющем большинстве точек измерений. Наличие отклонений показателя больше критического при калибровке цифрового мультиметра наблюдалось в ~2 % всех измерений. Для комбинированного прибора Ц4352 доля неудовлетворительных результатов во всем раунде сличений не превысила 1 %. Их анализ показал, что они могли быть результатами неправильных отсчетов показаний, их регистрации, ошибками оценки неопределенности. Даны рекомендации по контрольным измерениям в соответ-

ствующих точках калибровки. Состоялось обсуждение полученных результатов с участниками МСИ.

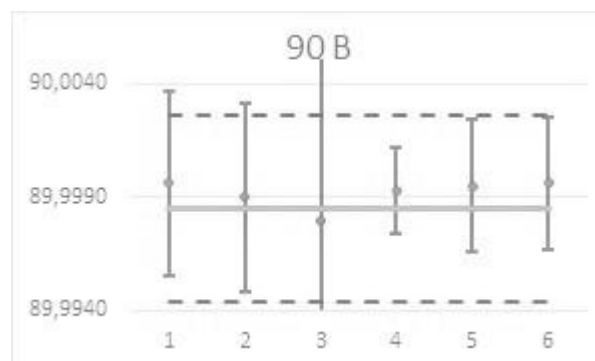


Рис. 1. Напряжение постоянного тока

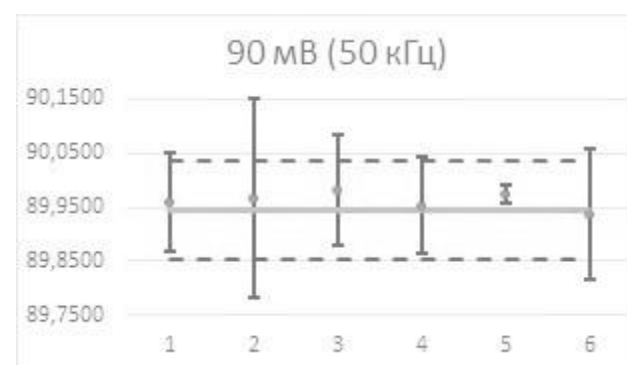


Рис. 2. Напряжение переменного тока

III. АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ МСИ ДЛЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ ПРЕДПРИЯТИЙ

Пилотный эксперимент показал наличие отклонений больше критических при оценке погрешностей практически в идеальных условиях хорошо оснащенных лабораторий с опытным персоналом для освоенных в практике поверки и калибровки приборов. Очевидно, что доля ошибок для уникальных приборов и методик калибровки, требующих специальной подготовки персонала, учета особенностей эталонной техники, внешних влияний, будет выше, чем в проведенном эксперименте. Поэтому можно признать проведение МСИ эффективным способом подтверждения квалификации метрологических лабораторий.

Как при поверке средств измерений, так и при их калибровке, основным определяемым параметром является погрешность средства измерений. При проведении МСИ в лабораториях, занимающихся оценкой характеристик средств измерений и контроля, контролируемый показатель контрольного прибора – оценка его погрешности. Соответственно показатель компетентности участника – функционал разности оценки погрешности и её приписанного значения. Это делает актуальным проведение МСИ не только для калибровочных лабораторий, но и для организаций, выполняющих поверку средств измерений в соответствии с действующим законодательством. Применение в рассмотренном примере МСИ показателя E_n , учитывающего неопределенности калибровки не должны сму-

щать поверителей, т.к. в распоряжении координаторов СМИ имеется арсенал показателей оценки компетентности, в т.ч. без учета неопределенности. Например, в стандарте [5] можно выбрать в качестве статистики Z показатель:

$$z = \frac{x - X}{\hat{\sigma}} \quad (2)$$

где $\hat{\sigma}$ - стандартное отклонение оценки квалификации, принимаемое участниками МСИ для достижения цели сличений.

Обязательным требованием к процедуре МСИ для поверочных и калибровочных лабораторий является определение погрешности x контрольного прибора в соответствии с применяемой методикой.

Целесообразность проведения МСИ не обязательно увязывать с оценкой и подтверждением компетентности лабораторий в Национальной системе аккредитации. Участие в МСИ становится средством для самоконтроля, которое позволяет выявить проблемы у каждого участника, и провести соответствующие предупреждающие и корректирующие действия.

При этом важно отметить, что каждый участник пользуется рекомендациями провайдера и сам проводит оценку полученных результатов и их критичность для работы. Если для одного участника возможно существование допустимого процента неудовлетворительных результатов, то для более точных производств, все результаты должны быть положительными. Именно регулярное участие лабораторий в МСИ позволяет получить оценку измерений, а так же исключить и предотвратить появление или распространение неправомерных (ошибочных) измерений.

На результаты поверки также могут оказывать влияние неучитываемые факторы, связанные с характеристиками эталонов, внешними условиями, несовершенством методики, субъективными ошибками. В случае регулярного проведения МСИ в группе метрологических лабораторий появляется возможность отследить появление опасных ситуаций с качеством поверки или калибровки и оперативно проводить необходимые корректирующие действия. При организации МСИ поверочных и калибровочных лабораторий в интегрированных производственных структурах появляется возможность оценивания и поддержания точности (неопределенности) определения погрешности средств измерений на приемлемом уровне. Необходимо учитывать, что организация и проведение МСИ для калибровочных лабораторий, работающих в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, является обязательным. Применение требований ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 для проверки их квалификации имеет ряд особенностей относительно испытательных лабораторий. Разработка программы проверки квалификации, планов проведения раундов сличений и, особенно, статистических планов, представляют собой сложную методическую работу. Целесообразно проводить пилотные раунды для отработки различных вариантов решения процедурных и методических вопросов для особенностей конкретных контрольных приборов, схемы проведения сличений, состава и целей участников МСИ. Например, при рассмотрении результатов описанного выше пилотного проекта МСИ участники

справедливо предложили изменения программы проверки, в т.ч. показателя оценки компетентности.

IV. Выводы

1) Принимая во внимание объективный характер результатов проверки квалификации поверочных и калибровочных лабораторий с помощью МСИ, целесообразно рекомендовать широкое участие в них предприятий промышленности. Области измерений, охватываемые МСИ, должны распространяться на средства измерений и контроля наиболее ответственных параметров продукции и услуг.

2) При сличениях результатов калибровки и поверки необходимо внимательно учитывать особенности применяемых методик и характеристик эталонов единиц величин. При оформлении и согласовании программ проверки квалификации и планов проведения МСИ следует обращать внимание на соответствие методических документов целям участия в МСИ (проверка методов и применяемого оборудования, учет влияния внешних факторов), выбор референтной лаборатории и показателя компетентности лабораторий, выбор диапазонов (контрольных точек) сличений.

3) Для предприятий, входящих в интегрированные производственные структуры и участвующих в производственной кооперации, целесообразно организовать регулярные МСИ результатов поверки и калибровки средств измерений. Это позволит создать дополнительный механизм поддержания заданного уровня измерений важнейших параметров продукции. По мере внедрения и совершенствования МСИ схемы проведения работ будут также совершенствоваться, становиться более удобными, а издержки – минимизироваться.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
- [2] Приказ Министерства экономического развития РФ от 30 мая 2014 г. N 326 "Об утверждении Критериев аккредитации, перечня документов, подтверждающих соответствие заявителя, аккредитованного лица критериям аккредитации, и перечня документов в области стандартизации, соблюдение требований которых заявителями, аккредитованными лицами обеспечивает их соответствие критериям аккредитации".
- [3] Результаты пилотного эксперимента по межлабораторным сличениям результатов калибровки электроизмерительных приборов / А. Кривов [и др.]. // Седьмой Международной научно-технической конференции «СУДОМЕТРИКА-2018». - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. - С. 8.
- [4] ГОСТ ISO/IEC 17043-2013, Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации.
- [5] ГОСТ Р ИСО 13528-2010, Статистические методы. Применение при экспериментальной проверке компетентности посредством межлабораторных сравнительных испытаний.
- [6] ГОСТ Р 50779.60-2017 (ИСО 13528:2015), Статистические методы. Применение при проверке квалификации посредством межлабораторных испытаний

Результаты пилотного эксперимента по межлабораторным сличениям результатов калибровки электроизмерительных приборов приборов

К. А. Бондин
ООО «Профигрупп»,
г. Санкт-Петербург, Россия
bondin@pg-spb.ru

А. С. Кривов
АО «НПФ «Диполь»,
г. Москва, Россия,
ask@dipaul.ru

П. И. Николаев
ООО «Профигрупп»,
г. Санкт-Петербург, Россия
nikolaev@pg-spb.ru

Е. А. Смирнова
АО «НПФ «Диполь»,
г. Москва, Россия,
SmirnovaEA@dipaul.ru

Аннотация — Представлены результаты двух раундов межлабораторных сличений результатов калибровки цифрового мультиметра и стрелочного комбинированного прибора, проведенных в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17043. Пилотный характер работ по сличениям позволил отработать организационные и методические вопросы, подготовить рекомендации по преодолению трудностей, связанных с особенностями деятельности отечественных метрологических лабораторий.

Ключевые слова — межлабораторные сличения, неопределенность результата калибровки, статистический показатель оценки участника, провайдер, референтная лаборатория

I. ВВЕДЕНИЕ

Группа компаний Диполь имеет многолетний опыт поставки эталонов и средств измерений FLUKE и Keysight в области радио- и электрических измерений предприятиям и организациям различных отраслей экономики. Несколько лет назад метрологическая лаборатория была аккредитована в Национальной системе аккредитации для проведения поверки и калибровки средств измерений. Поэтому для большинства клиентов мы поставляем средства измерений со свидетельством о поверке и/или сертификатом о калибровке. Периодически мы сталкиваемся со случаями недоверия к результатам нашей работы, а также к результатам поверки и калибровки приборов в собственных лабораториях и даже в национальном метрологическом институте.

В связи с этим мы обратили внимание на такой инструмент проверки квалификации лабораторий как межлабораторные сравнительные испытания (МСИ). В настоящем докладе излагаются результаты нашего пилотного проекта в организации и проведении межлабораторных сличений калибровки электроизмерительных приборов. На начальном этапе организации работы пришлось учитывать особенности деятельности отечественных метро-

логов по оценке и подтверждению характеристик средств измерений. Во-первых, большинство предприятий и организаций аккредитовано в области поверки средств измерений без обязательного выполнения требований ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 в части оценки и расчета неопределенности измерений. В основном лаборатории предпочитают традиционные методы работы и скептически относятся к использованию непривычных способов оценки точности результатов измерений. Количество аккредитованных лабораторий по калибровке приборов в отдельных видах измерений по ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009 не превышает нескольких единиц. Это ограничивает возможности применения требований ГОСТ ISO/IEC 17043-2013, в первую очередь, статистических методов анализа результатов. Во-вторых, отечественное законодательство позволяет метрологам предприятий и организаций успешно обходиться без проведения межлабораторных сличений. Чтобы сформировать группу участников пилотных сличений была проведена работа по поиску и выбору лабораторий, заинтересованных в повышении качества своей деятельности.

II. ПРОВЕДЕНИЕ СЛИЧИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

В группу участников межлабораторных сличений вошли метрологические лаборатории 7-ми крупных предприятий, аккредитованные или готовящиеся к аккредитации в области поверки и калибровки средств измерений.

В качестве контрольных образцов для проведения сличений были выбраны широко применяемые в промышленности электроизмерительные приборы: цифровой мультиметр типа 34401A фирмы Keysight и комбинированный прибор типа Ц4352 (рис. 1).

Основные метрологические характеристики приборов приведены в документации на приборы.

Цифровой мультиметр 34401A – это современный высокоточный многофункциональный прибор для измерения

напряжения постоянного и переменного тока, силы постоянного и переменного тока, частоты переменного тока и электрического сопротивления. Он широко применяется на предприятиях РФ. Погрешность измерения данного мультиметра составляет тысячные доли от измеряемого значения.

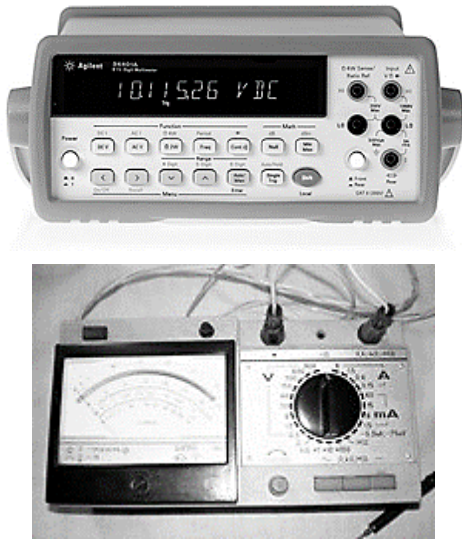


Рис. 1. Электроизмерительные приборы – контрольные образцы для межлабораторных сличений

Прибор Ц4352 является более грубым прибором с погрешностью в пределах $\pm (1 - 1,5) \%$ и представляет поколение электроизмерительных приборов с магнитоэлектрической системой. Сличения результатов калибровки этих приборов проводились по измерениям напряжения и силы постоянного и переменного тока. По мнению организаторов сличений такой выбор контрольных образцов позволил в пилотном проекте не отвлекаться на изучение широко применяемых приборов, получить большой массив экспериментальных данных, сравнить результаты оценки квалификации для приборов с различным уровнем конструктивной сложности и показателей точности.

В соответствии с областями аккредитации участников и их заинтересованностью, в работах по сличению результатов калибровки цифрового мультиметра приняли участие 6 лабораторий, а прибора Ц4352 – 5 лабораторий. Цели участников сличений состояли в экспериментальной проверке своей квалификации, в т.ч. квалификации персонала, качества поверки (калибровки) применяемых эталонов единиц величин и других составляющих компетентности лабораторий.

Для проведения сличений была использована стандартная последовательная программа сличений результатов калибровки контрольных образцов. При реализации данного типа программы образец для проверки квалификации передается последовательно от одного участника к другому.

В соответствии с программой проверки квалификации были разработаны планы проведения двух раундов сличений – по мультиметру 34401A и по прибору Ц4352.

Для подтверждения стабильности образцов была дважды проведена их калибровка в референтной лаборато-

рии. Стабильность контрольных образцов подтверждена протоколом оценки стабильности по результатам повторной калибровки приборов в референтной лаборатории. В качестве референтной лаборатории была выбрана аккредитованная лаборатория ООО «Профигрупп».

III. ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ СЛИЧЕНИЙ

Анализ результатов является основной содержательной частью МСИ, так как на данном этапе определяются характеристики функционирования участников, которые представляют собой комплексный параметр, характеризующий способность лаборатории выполнять те или иные измерения/испытания и получать правомочные результаты. Способы оценки результатов межлабораторных сличительных испытаний установлены в стандарте ГОСТ Р ИСО 13528-2010 и зависят от данных, предоставляемых участниками и задач, в которых заинтересованы лаборатории-участники.

Статистический анализ данных проводился в соответствии с ГОСТ ISO/IEC 17043-2013 и включал в себя следующие процедуры:

- установление приписанных значений погрешности измерений и значений их расширенной неопределенности;
- расчет статистических показателей результатов сличений для каждого участника;
- интерпретация статистических показателей для оценки результатов участников;
- оценка стабильности используемого контрольного образца.

В качестве приписанных значений контрольных образцов использовались значения, полученные при их калибровке в референтной лаборатории с помощью многофункционального калибратора Fluke 5522A, аттестованного в качестве эталона единиц электрических величин. Контрольные точки определяются методиками калибровки, разработанными провайдером сличений. Определение значений расширенной неопределенности приписанных значений также осуществлялось по методикам калибровки.

Статистическим показателем, выбранным для оценки результатов участников, стал показатель E_n по пункту 7.5 ГОСТ Р ИСО 13528-2013.

Для каждого окончательного результата измерения значение E_n рассчитывается по формуле:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

где:

x – значение, определенное в лаборатории участника;

X – приписанное значение, определенное в экспертной лаборатории;

U_{ref} – расширенная неопределенность X ;

U_{lab} – *расширенная неопределенность результата участника x.*

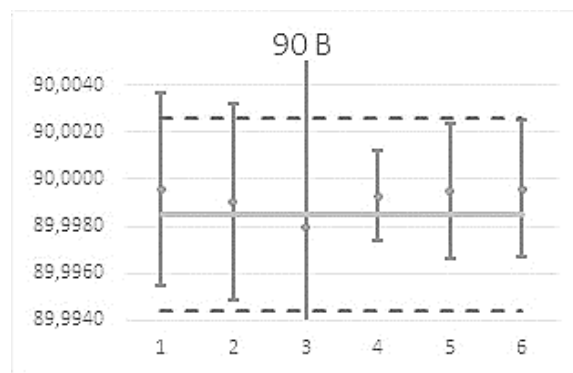
При оценивании показателя E_n устанавливаются следующие уровни оценки:

если $|E_n| \leq 1$ – результат лаборатории-участника признается удовлетворительным;

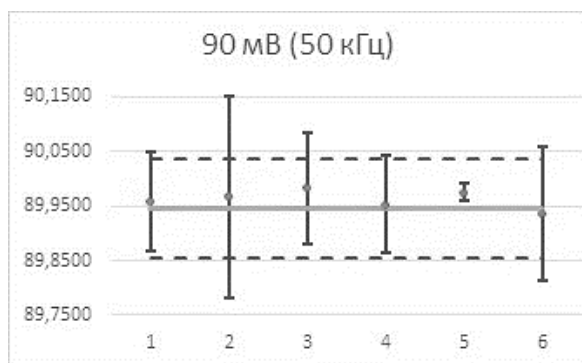
если $|E_n| \geq 1$ – результат лаборатории-участника признается неудовлетворительным.

После проведения статистического анализа, с помощью выбранного критерия, и обработки результатов измерений были сформированы отчеты по каждому раунду. Результаты участников и оценки их квалификации представлены в виде таблиц и графиков, приведенных в отчетах.

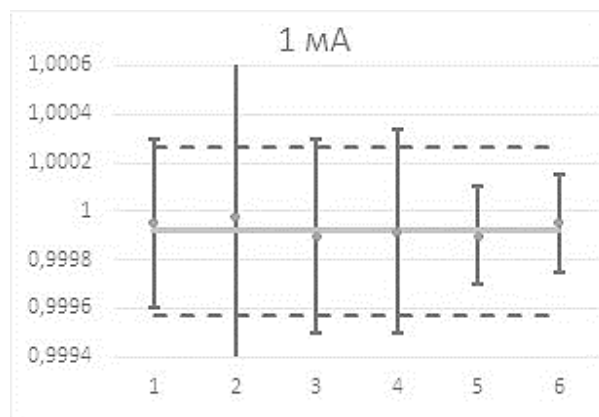
Ниже на рис. 2 и 3 приведены примеры графиков результатов сличений. В виде горизонтальной сплошной линии на рисунках представлено приписанное значение X . Пунктирными линиями обозначена неопределенность для приписанного значения. Значения участников изображены маркерами, расширенная неопределенность обозначена отклонениями для маркеров соответственно.



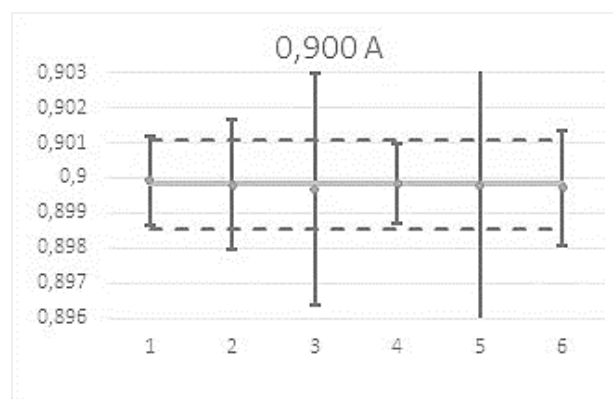
а. Измерение напряжения постоянного тока



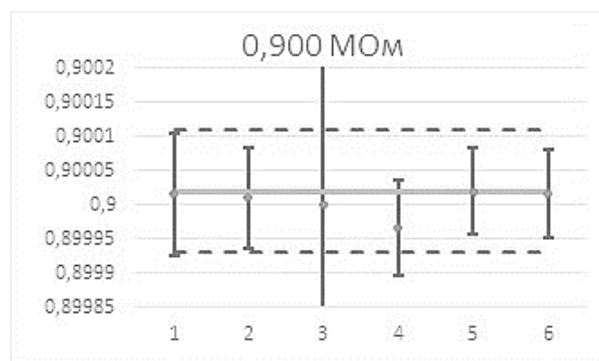
б. Измерение напряжения переменного тока



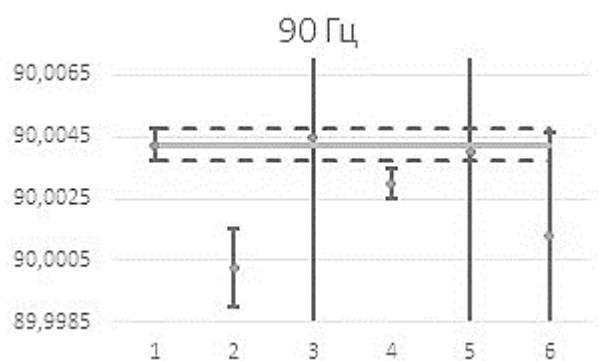
в. Измерение силы постоянного тока



г. Измерение силы переменного тока



д. Измерение электрического сопротивления



е. Измерение частоты

Рис. 2. Результаты калибровки мультиметра 34401А

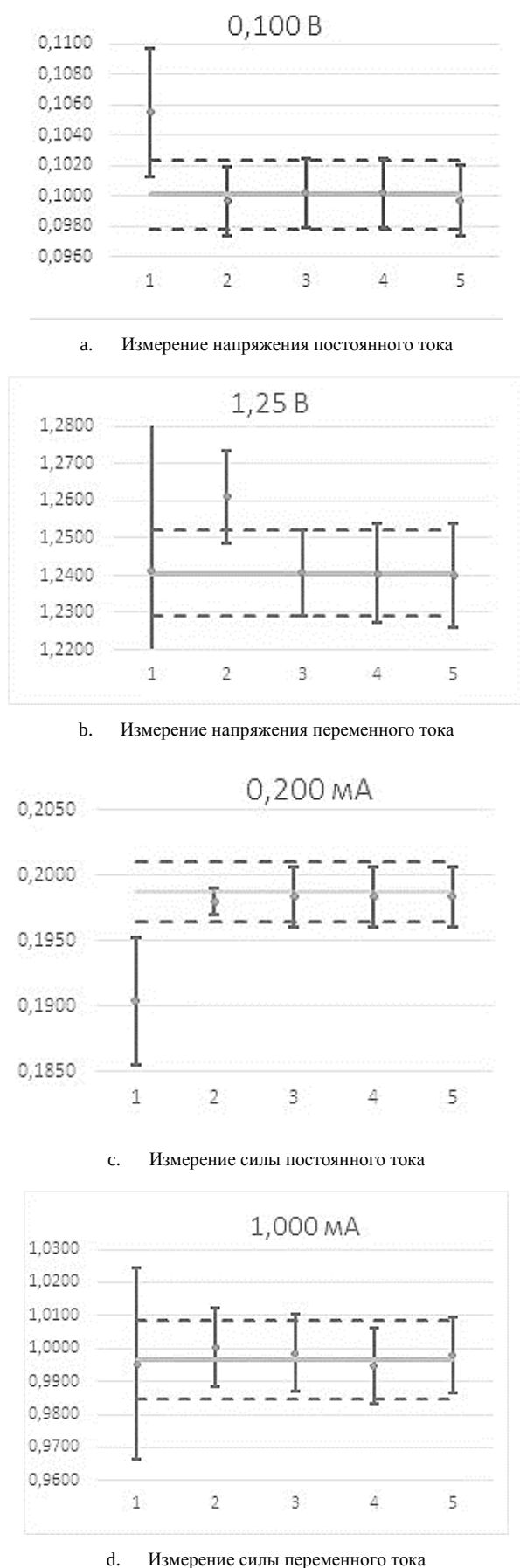


Рис. 3. Результаты калибровки комбинированного прибора Ц4352

Последним этапом рассмотренного статистического анализа является подтверждение стабильности контрольных образцов.

При определении стабильности сравнивают среднее арифметическое результатов измерений при калибровке, проведенной до тура испытаний и среднее арифметическое, полученное при калибровке после завершения тура испытаний. Образец можно считать стабильным, если

$$|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| \leq 0,3\hat{\sigma} \quad (2)$$

где:

$\bar{X}_1$ – среднее значение, получение при первой калибровке в референтной лаборатории;

$\bar{X}_2$ – среднее значение, получение при заключительной калибровке в референтной лаборатории;

$\hat{\sigma}$ – стандартное отклонение оценки компетентности (в качестве оценки компетентности в данном раунде принимается предельное отклонение показаний контрольного образца, установленное в спецификации изготовителя).

Стабильность контрольных образцов подтверждена протоколом оценки стабильности по результатам повторной калибровки приборов в референтной лаборатории.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ СЛИЧЕНИЙ

В результате раундов сличений получен большой объем экспериментальных данных. В каждой из участвующих в сличениях лабораторий были проведены серии измерений в 40 точках для мультиметра и 175 точках – для стрелочного прибора.

В каждой лаборатории-участнике были получены отрицательные результаты сличений хотя бы в одной точке калибровки контрольных приборов. В качестве возможных причин неудовлетворительных результатов сделаны предположения о некорректной обработке данных при обработке результатов измерений и оценке неопределенности проведенных измерений, недостаточно точное соблюдение всех процедур, предусмотренных методиками измерений, ошибки при оформлении (заполнении) протоколов измерений. В отдельных случаях целесообразно рассмотреть влияние систематических погрешностей используемого эталона и отсчет неустановившихся показаний приборов. Даны рекомендации по контрольным измерениям в соответствующих точках калибровки.

V. ВЫВОДЫ

- 1) Основная цель организации пилотного проекта межлабораторных сличений результатов калибровки достигнута – провайдер сличений приобрел необходимый опыт методического и технического обеспечения работ, разработанные документы (программа сличений, планы раундов, инструкции участникам, методики калибровки) успешно прошли апробацию. Участники получили опыт участия и понимание системы проведения и реализации МСИ в своих лабораториях.

- 2) Лаборатории в основном подтвердили свою квалификацию по применяемому критерию Еп. При калибровке цифрового мультиметра наличие отклонений показателя больше критического уровня наблюдалось примерно в 2 % всех измерений. Для этого раунда сличений каждый из участников имел по одной-две точки сличений с неудовлетворительными результатами. Их анализ показал, что они могли быть результатами неправильных отсчетов показаний, их регистрации, ошибками оценки неопределенности. Даны рекомендации по контрольным измерениям в соответствующих точках калибровки. Для комбинированного прибора Ц4352 доля неудовлетворительных результатов во всем раунде сличений не превысила 1 %. Получены неудовлетворительные результаты для одного участника на точках постоянного напряжения и для другого участника – при переменном напряжении. Предположительно, это связано с непригодностью применяемых эталонов или снятием отсчетов до установления показаний. Участникам, получившим неудовлетворительные результаты, рекомендовано провести анализ причин, которые могли привести к получению неудовлетворительных результатов, более внимательно относиться к оценке неопределенности результатов измерений и записи измеренных значений, а также обеспечить более высокую эффективность внутрилабораторного контроля качества результатов измерений.
- 3) Выбор в качестве референтной лаборатории ООО «Профигрупп», которая имеет такой же уровень неопределенности калибровки, как и некоторые из участников сличений, не составил трудностей при анализе результатов и их согласовании участниками. При этом метод выбора приписанного значения стал предметом дискуссии с участниками эксперимента, и был выбран альтернативный метод для дополнительного статистического анализа – выбор робастного среднего значения для всей выборки полученных результатов с вычислением соответствующей неопределенности приписанного значения. При этом не наблюдалось значительных изменений в результатах участников, и средний процент неудовлетворительных результатов остался на том же уровне.
- 4) Большинство из участников сличений аккредитованы на деятельность по поверке средств измерений. Они освоили и применяли при сличениях предложенную методику калибровки, в т.ч. оценивание неопределенности результатов. Поскольку при калибровке, как и при поверке оцениваются характеристики погрешности приборов, то можно сделать вывод, что полученные результаты подтверждают квалификацию лабораторий при проведении не только калибровки, но также и поверки приборов.
- 5) В ходе проведения работ провайдер столкнулся с рядом трудностей, связанных с применением требований стандартов:
 - мотивы участия лабораторий в межлабораторных сличениях результатов калибровки носят случай-

ный, а не системный характер. К ним относятся сомнения в применяемых эталонах единиц величин, опробование методик калибровки с оценкой неопределенности результатов, потенциальная возможность внедрения требований ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009.

- применение в лабораториях эталонов, которые прошли поверку без калибровки, привело к оценке составляющих неопределенности, связанных с эталонами, - по типу В (по ГОСТ Р 54500.3-2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3-2008). Поэтому оценки неопределенности калибровки соизмеримы с допускаемыми отклонениями показаний контрольных приборов. Это снижает ценность полученных результатов сличений по выбранному критерию.
- обсуждение результатов с участниками сличений выявило потенциальные возможности совершенствования процедуры. Они связаны с выбором статистического показателя для оценки результатов лабораторий, стандартного отклонения оценки компетентности и выборе составляющих неопределенности. Целесообразно при организации сличений калибровочных лабораторий рассмотреть различные варианты определения приписанных значений для контрольных приборов, стандартного отклонения оценки компетентности и, соответственно, оценочных статистик. В программе предусмотреть этап согласования статистического плана с участниками сличений.

По результатам анкетирования специалисты провайдера и лабораторий-участников были удовлетворены уровнем проведенных работ и их результатами. Целесообразно рекомендовать учесть полученный опыт и провести новые раунды МСИ результатов калибровки электроизмерительных приборов для большего количества лабораторий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009, Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
- [2] ГОСТ ISO/IEC 17043-2013, Оценка соответствия. Основные требования к проведению проверки квалификации.
- [3] ГОСТ Р ИСО 13528-2010, Статистические методы. Применение при экспериментальной проверке компетентности посредством межлабораторных сравнительных испытаний.

Особенности калибровки приёмников векторных и скалярных величин гидроакустического поля в условиях отражающего бассейна

А. Н. Матвеев, Г. С. Некрич, И. В. Черников
НИО-5 «Метрология гидрофизических измерений»
ФГУП «ВНИИФТРИ»
Московская обл., РФ
matveev@vniiftri.ru

Аннотация — Приводятся данные о разработанном в ФГУП «ВНИИФТРИ» рабочем эталоне 2 разряда для калибровки гидроакустических приёмников в лабораторном незаглушенном бассейне. Эталон реализует измерительную процедуру метода взаимности в свободном поле сферической бегущей звуковой волны с использованием трёх преобразователей. Особенностью эталона является измерение абсолютным методом чувствительности по свободному звуковому полю гидрофонов в частотном диапазоне от 1 кГц до 200 кГц и приёмников векторных величин звукового поля на частотах от 1 кГц до 10 кГц. Условия свободного поля при измерениях обеспечивают применением как метода временной селекции тональных импульсов, так и техники скользящего комплексного взвешенного усреднения.

Ключевые слова — калибровка по полю; лабораторный бассейн; сигнал с распределенной по частоте мощностью; метод скользящего комплексного взвешенного усреднения

I. ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение единства измерений в области подводной акустики является одним из основных направлений научно-технической деятельности ФГУП «ВНИИФТРИ» как Государственного научного метрологического института РФ. Совершенствование отечественной эталонной гидроакустической базы с целью повышения точности измерений, расширения функциональных возможностей, сокращения диспропорции между точностью эталонных измерений и измерений, выполняемых в условиях морской акватории, входит в ряд приоритетных задач по обеспечению потребностей предприятий судостроительной промышленности.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом последних разработок специалистов ФГУП «ВНИИФТРИ» является рабочий эталон (РЭ) МГФК.411711.276 для калибровки гидроакустических приёмников (ПП) в условиях незаглушенного бассейна. Особенностью эталона является объединение в себе функций калибровки приёмников звукового давления – гидрофонов и приёмников векторных величин звукового поля (ВП): колебательной скорости (ПКС) или градиента звукового давления (ПГД).

Рабочий эталон с расширенными функциональными возможностями разработан с целью обновления существующего парка эталонных установок, большинство из

которых находятся в эксплуатации более 10 лет, и обеспечивает (для бассейна с минимальным размером 4 м) следующие показатели:

- измерение непрерывных частотных зависимостей чувствительности ВП в диапазоне от 1 до 10 кГц;
- измерение чувствительности и характеристик направленности гидрофонов в диапазоне от 1 до 200 кГц;
- доверительные границы относительной погрешности калибровки ВП при доверительной вероятности $P=0,95$ от 1,5 до 2,5 дБ (в зависимости от типа и конструкции ВП);
- доверительные границы относительной погрешности калибровки измерительных гидрофонов не более 1,5 дБ.

Принципы калибровки гидрофонов в свободном поле сферической звуковой волны подробно описаны в технической литературе и стандартизованы, однако следует обратить внимание на особенность, отличающую новый эталон от предшествующих разработок. Условия свободного поля при измерениях на РЭ в незаглушенном бассейне обеспечивают применением как метода временной селекции тональных импульсов, так и созданной в ФГУП «ВНИИФТРИ» техники скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) передаточного импеданса пары излучатель-приёмник в реверберационном поле [1-4].

Использование в РЭ техники СКВУ для калибровки гидрофонов расширило в область низких частот (до 1 кГц) диапазон измерений по свободному полю в бассейне с минимальным размером 4 м, позволило получать практически непрерывные амплитудно- и фазочастотные характеристики чувствительности, чувствительности в полосах частот, выполнять калибровку на продолжительных сигналах с распределённой по частоте мощностью (линейно частотно-модулированных или шумовых) [5, 6]. Последнее означает, что передача единицы при калибровке средства измерений осуществляется на том же типе сигнала и в тех же условиях, которые соответствуют реальным сигналам и условиям при использовании ПП по назначению.

В практике гидроакустических измерений ВП получают всё большее распространение. Исторически сложилось так, что первые ВП были низкочастотными и их рабочий

диапазон распространялся на частоты не выше 1 кГц. Возможность калибровки ВП, которую выполняли в камерах малого объёма, также была ограничена низкими частотами. Частотный диапазон современных ВП перешагнул далеко за частоту 1 кГц. Прошли испытания в целях утверждения типа и внесены в Государственный реестр комбинированные векторные приёмники на частоты до 10 кГц. На завершающей стадии находится разработка ряда отечественных ПКС на частоты до 50 кГц. Многие отечественные организации используют приёмники импортного производства, широко применяя их при морских изысканиях в антеннах для акустической 2D и 3D съёмки. Реализация в РЭ техники СКВУ позволяет измерять чувствительность ВП к скалярной (звуковое давление) и векторным (колебательная скорость, градиент давления) величинам акустического поля в частотном диапазоне от 1 до 10 кГц [2, 7-8].

Разработанный РЭ состоит из аппаратуры излучающего и приёмно-измерительного трактов, координатной системы для позиционирования и перемещений преобразователей, вычислительной системы, работающих под управлением разработанного программного комплекса. Структурная схема рабочего эталона представлена на рис. 1.

Калибровку ГП на рабочем эталоне выполняют в лабораторном бассейне. Чувствительность приёмника определяют абсолютным методом, применяя измерительную процедуру метода взаимности в свободном поле бегущей сферической звуковой волны с использованием трёх преобразователей: излучатель (И), обратимый преобразователь (ОП) и калибруемый ГП. Условия локально плоской падающей на ГП звуковой волны обеспечивают, удаляя приёмник от излучателя и ОП на достаточные расстояния. Необходимого соотношения сигнал/шум достигается когерентным накоплением принимаемых сигналов [1].



Рис. 1. Структурная схема РЭ

В процессе калибровки на частотах от 1 до 10 кГц излучают продолжительные (много превышающие время реверберации бассейна) квадратурно дополненные ЛЧМ сигналы. В реверберационном звуковом поле бассейна по очереди измеряют частотные зависимости пар излучатель-приёмник: И-ОП, И-ГП, ОП-ГП. Влияние отражённых границами бассейна сигналов подавляют, обрабатывая полученные частотные зависимости по методу СКВУ. Особенность реализации метода взаимности при калибровке ВП состоит в том, что в отсутствие взаимного обратимого ВП роль ОП выполняет приёмник звукового дав-

ления – гидрофон [8]. Результатом калибровки ВП является его подробная частотная характеристика чувствительности, выраженная в единицах звукового давления [$\text{мкВ} \cdot \text{Па}^{-1}$], градиента звукового давления [$\text{м} \cdot \text{мкВ} \cdot \text{Па}^{-1}$] или колебательной скорости водной среды [$\text{мкВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}$]. На частотах выше 10 кГц калибровку гидрофонов выполняют, излучая тональные импульсы.

В таблице 1 представлены доминирующие источники погрешности измерений РЭ при калибровке ВП.

Оценки погрешности и неопределённости результата измерений:

- границы НСП 8,0 %;
- СКО результата измерений 2,5 %;
- неопределённость по типу А 2,5 %;
- стандартная неопределённость по типу В 8,5 %;
- суммарная стандартная неопределённость 8,9 %;
- расширенная неопределённость (при $k = 2$) 17,7 %.

Таблица 1. Границы составляющих неучтённой систематической погрешности (НСП)

Составляющая НСП	Значение (%)
обусловленная направленностью гидроакустических преобразователей	1,00
обусловленная влиянием электрического шума, включающего высокочастотную наводку	0,10
обусловленная квантованием аналогового сигнала	0,60
определения сопротивления в цепи обратимого преобразователя	0,20
обусловленные: рассеянием звуковой волны креплением эталонного приёмника	1,00
остаточным влиянием отражений от границ бассейна	0,50
определения отношения передаточных импедансов $Z_{\text{и-оп}}/Z_{\text{и-г}}$	2,00
определения передаточного импеданса $Z_{\text{оп-г}}$	1,80
обусловленная неточностью коэффициента усиления предусилителя	0,60
обусловленная искажением частотной зависимости при применении обработки по методу СКВУ	0,50
обусловленная влиянием перекрёстной электрической помехи	0,50
обусловленная нарушением условий дальнего поля	4,30
обусловленная отличием звуковой волны от плоской	0,50
обусловленная неточностью расстояния между преобразователями	0,50
обусловленная нарушением критерия взаимности обратимого преобразователя	0,50
возникающая вследствие коррекции электрической нагрузки	0,50
при определении скорости звука в водной среде	0,10
при определении плотности воды	0,10
установки частоты генератора	0,01

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные метрологические характеристики дают основание полагать, что разработанный РЭ будет востре-

бывавшими ведущими гидроакустическими организациями и предприятиями судостроительной промышленности РФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Е. Исаев, “Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля,” Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 369 с., 2008.
- [2] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, С.В. Сильвестров, Патент № 2390968 “Способ градуировки гидрофона по полю при излучении непрерывного сигнала в измерительном бассейне с отражениями,” Опубликовано 27.05.2010, БИ № 15.
- [3] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, “Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберирующем бассейне,” Акуст. журн., Т. 55, № 6, с. 727-736, 2009.
- [4] А.М. Еняков, А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев и др., “Российско-китайские пилотные сличения результатов калибровок гидрофонов в диапазоне частот от 250 Гц до 200 кГц,” Измер. техн., № 6, с. 33-37, 2011.
- [5] А.Е. Исаев, И.В. Черников, “Лабораторная градуировка гидроакустического приёмника в реверберационном поле шумового сигнала,” Акуст. журн., Т. 61, № 5, с. 1-9, 2015.
- [6] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, “Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника,” Акуст. журн., Т. 56, № 5, с. 651-654, 2010.
- [7] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов, “Градуировка приемника градиента давления по полю в отражающем бассейне с применением ЛЧМ сигнала,” Акуст. журн., Т. 59, № 6, с. 773-781, 2013.
- [8] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, Г.С. Некрич, А.М. Поликарпов, “Комплексная градуировка приемника градиента давления с использованием процедуры метода взаимности,” Акуст. журн., Т. 60, № 1, с. 48-55, 2014.

О низкочастотной калибровке гидрофонов в незаглушенном бассейне малых размеров

Н. Г. Щерблюк
НИО-5
ФГУП «ВНИИФТРИ»

Аннотация — В работе обоснована возможность применения цифрового фильтра для низкочастотной (от 3-4 кГц) калибровки гидроакустических приёмников по свободному полю в бассейне малых (от 1 м) размеров. Приведены результаты калибровок гидрофонов Reson TC4034 и ГИ-55 при излучении широкополосного сигнала с применением цифровой фильтрации. Полученные результаты сравнены с результатами калибровки этих гидрофонов на тональном импульсе.

Ключевые слова—гидроакустика; калибровка; гидрофон; фильтрация

I. ВВЕДЕНИЕ

Метрологическим обеспечением в области гидроакустических измерений в нашей стране занимается ФГУП «ВНИИФТРИ». В этом институте находятся государственные первичные эталоны единиц давления, скорости звука, а также недавно введённый в эксплуатацию (2017 г.) эталон единицы колебательной скорости в водной среде. Данная эталонная база на протяжении всей своей истории с момента создания в 70-х годах 20-го века и до сегодняшнего момента претерпевала множество этапов модернизации. Непрерывная работа по усовершенствованию эталонных установок позволяет улучшать их метрологические характеристики и использовать в их составе современное высокоточное цифровое и аналоговое оборудование. Высокий уровень эталонных измерений был неоднократно подтверждён при международных сличениях. Для потребителей единицы звукового давления (ВМФ, АО «Концерн «ОКЕАНПРИБОР», ЦНИИ им. Крылова и др.) гидроакустические подразделения ВНИИФТРИ осуществляют производство гидроакустических средств измерений (приёмников звукового давления, приёмников градиента давления), а также разработку и создание установок вторичных эталонов единицы давления. Кроме того, во ВНИИФТРИ ведутся исследования по возможности применения новых методов измерения характеристик гидрофонов, основанных на излучении широкополосных длительных сигналов. Применение этих сигналов позволяет решать такие задачи, как получение непрерывных частотных характеристик (ЧХ) чувствительности приёмников, строить двумерные частотно-угловые распределения их чувствительности, определять частотную зависимость коэффициентов отражения и поглощения материалов в воде и др. При проведении измерений характеристик гидрофонов в незаглушенном бассейне с применением широкополосных сигналов подразумевается дальнейшая математическая обработка результата измерения с целью подавления влияния ревербераций бассейна. Среди существующих подходов можно выделить метод скользящего

квадратичного взвешенного усреднения (СКВУ) [1,2], спектрометрию временных задержек [3] и близко примыкающую к ней цифровую кепстральную обработку [4]. В данной работе мы будем говорить о постобработке результата измерений, основанной на применении цифровой фильтрации в частотной области. Данный подход позволит осуществлять калибровку приёмников звукового давления в незаглушенном бассейне малых (1-1,5 м) размеров, начиная с минимальной частоты 4 килогерца.

II. КАЛИБРОВКА ПРИЁМНИКОВ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ТОНАЛЬНОМ ИМПУЛЬСЕ

При рассмотрении вопроса о хранении и передаче единицы звукового давления в воде в частотном диапазоне от сотен герц до сотен килогерц традиционно возникает следующая метрологическая задача: калибровка приёмников звукового давления (гидрофонов) в бассейне по свободному полю. Напомним терминологию. Под калибровкой гидрофона понимается измерение частотной зависимости чувствительности гидрофона в заданном частотном диапазоне. Свободным звуковым полем называется поле акустических волн, распространяющихся в безграничной и однородной среде. Таким образом, калибровка гидрофона по свободному полю означает измерение ЧХ его чувствительности в условиях бесконечной однородной среды или же, когда влиянием отражённых волн можно пренебречь.

Широко распространённым абсолютным способом определения чувствительности приёмника является так называемый метод взаимности [5], основанный на поочерёдном измерении ЧХ передаточных импедансов (ПИ) трёх пар излучатель-приёмник. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать измерение по свободному полю ЧХ ПИ пары излучатель-приёмник. Под передаточным импедансом понимают следующее. Пара гидрофонов излучатель-приёмник представляют как линейную систему и исследуют её реакцию на гармонический сигнал вида $Asin(\omega t)$. На вход системы подаётся ток возбуждения излучателя, а на выходе системы регистрируется напряжение с выхода гидрофона-приёмника. Токовым сигналом, подаваемым на излучатель, является тональный импульс с амплитудой A и заданной частотой ω . Выходным сигналом будет более сложный сигнал, начинающийся с переходного процесса, после которого возникает устоявшаяся часть, где сигнал можно считать гармоническим с амплитудой B и частотой токового сигнала ω : $Bsin(\omega t)$. Таким образом, передаточный импеданс на частоте ω определяют как отношение амплитуд B/A . Со-

ответственно данный метод определения импеданса называется тонально-импульсным (тонально-импульсный метод – ТИМ). В условиях незаглушенного бассейна длительность устоявшейся части выходного сигнала зависит от длительности переходного процесса и временной задержки τ_1 , которая есть время прихода первого отражённого от границ бассейна сигнала относительно момента излучения. Чем меньше размеры бассейна, тем меньше величина τ_1 и, следовательно, короче устоявшаяся часть сигнала. Таким образом, устоявшаяся часть сигнала называется «зажатой» между переходным процессом и отражёнными сигналами. А поскольку для адекватной оценки амплитуды гармонического сигнала на его длительности должен укладываться хотя бы один период колебаний, то размеры бассейна определяют минимальную частоту калибровки по свободному полю. Это одно из главных ограничений ТИМ, поскольку для калибровки низкочастотных гидрофонов необходимо иметь бассейн крупных размеров. Например, бассейн с размерами $6 \times 6 \times 10$ м, расположенный во ВНИИФТРИ и входящий в состав Государственного эталона ГЭТ55-2017, позволяет калибровать гидрофоны ТИМ с приемлемой точностью, начиная с частоты в 1 кГц.

III. КАЛИБРОВКА ПРИЁМНИКОВ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ НА ШИРОКОПОЛОСНОМ СИГНАЛЕ

Другим ограничением ТИМ является то, что ЧХ чувствительности гидрофона измеряется на дискретной сетке частот, как правило, в точках третьоктавного ряда. Однако существует практическая необходимость знать характеристику чувствительности приёмника более подробно, с малым шагом по частоте. Более подробное определение чувствительности ТИМ сопряжено с длительными измерениями (десятки часов), во время которых может нарушаться единые условия измерения для всех частот. Это мотивирует использовать сигналы с широким спектральным составом, использование которых в течение небольшого промежутка времени позволяет получить подробный частотный отклик приёмника. В данной работе под широкополосными сигналами будем понимать сигналы длительностью по времени от десятков мс до сотен мс и имеющие равномерную спектральную характеристику в полосе частот шириной до сотен кГц. К таким сигналам можно отнести гармонические сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ сигналы), а также шумоподобные сигналы. Перечислим основные преимущества использования широкополосных сигналов для калибровки гидрофонов.

— Возможность, не прибегая к длительным измерениям, получать чувствительность приёмника во всём его рабочем диапазоне частот с малым шагом по частоте.

— Используя различные цифровые методы постобработки измеренных результатов можно существенно снизить минимальную частоту калибровки в незаглушенном бассейне.

Главным препятствием при использовании широкополосных сигналов для калибровок гидрофонов в незаглушенном бассейне является то, что ПИ измеряются не в свободном поле звуковой волны, а в реверберационном. Иными словами, на результат калибровки влияет эхо, вызванное отражениями от границ бассейна (так называемая реверберация). Для оценочных измерений влияние ревер-

берации бассейна можно не учитывать, существенно увеличив тем самым погрешность измерений. Однако необходимая точность первичных и вторичных эталонов требует более сложного решения данной задачи. При этом заглушение бассейна звукопоглощающим материалом выглядит довольно дорогим решением с экономической точки зрения. Поэтому целесообразно искать иные пути подавления ревербераций. В данной работе предлагается методика очищения ЧХ комплексного ПИ, измеренного в реверберационном поле, основанная на цифровой фильтрации ЧХ.

Прежде чем говорить об этом методе подробнее, рассмотрим в качестве примера, как измеряют ЧХ комплексного ПИ пары излучатель-приёмник при излучении длительного ЛЧМ сигнала. Пусть в момент времени $t = 0$ излучатель возбуждают косинусным током в течение времени T : $i_{\cos}(t) \sim \cos(\omega[t]t)$, $0 \leq t \leq T$. Где частота колебаний тока $\omega[t]$ изменяется во времени по линейному закону от начальной частоты $\omega_0 = 2\pi f_0$ до конечной частоты $\omega_T = \omega[T]$:

$$\omega[t] = \omega_0 + \pi s t.$$

Величина $s = \omega_T / (2\pi T)$ есть скорость разворачивания частоты $\omega[t]$, а $\Delta F = (\omega_T - \omega_0) / (2\pi)$ называют шириной частотной полосы. В каждый фиксированный момент времени t' , начиная с момента t_0 (время прохождения прямой звуковой волны от излучателя к приёмнику относительно $t = 0$), на гидрофон-приёмник падает звуковая волна со всё возрастающей со временем частотой $\omega[t'] \sim t'$. Поэтому принимаемый сигнал будет соответствовать отклику системы в течение времени T на непрерывное множество гармонических сигналов с частотами от ω_0 до ω_T . Обозначим напряжение принимаемого сигнала как $u_{\cos}(t)$. Далее сигнал с приёмника оцифровывается ЦАП с частотой дискретизации F_d . Чтобы получить комплексный импеданс, излучатель возбуждают также синусным током с теми же параметрами: $i_{\sin}(t) \sim \sin(\omega[t]t)$. Отклик приёмника с напряжением $u_{\sin}(t)$ также оцифровывают ЦАП. ЧХ комплексного ПИ пары излучатель-приёмник в реверберационном поле определяют как отношение комплексных выходного напряжения $\dot{U}_{\text{вых}}(t) = u_{\cos}(t) + j u_{\sin}(t)$ и входного тока возбуждения $\dot{I}_{\text{вх}} = i_{\cos}(t) + j i_{\sin}(t)$

$$\dot{Z}_{\text{пев}}(t \rightarrow f) = \left. \frac{\dot{U}_{\text{вых}}(t)}{\dot{I}_{\text{вх}}(t - t_0)} \right|_{t_0 \leq t \leq t_0 + T}.$$

Замена $t \rightarrow f$ означает, что зависимость импеданса от частоты f получается заменой шкалы времени t на шкалу частот f по следующему простому правилу

$$f = f_0 + \pi s(t - t_0).$$

Заметим, что, значения комплексного ПИ $\dot{Z}_{\text{рев}}(f) = \dot{Z}_{\text{рев}}(f_n)\delta(f - f_n)$ рассматриваются на дискретной сетке частот

$$f_n = f_0 + n\Delta f = f_0 + ns / F_d, \quad n \in [0, N],$$

где $N = TF_d$. Если бы не было отражённых волн, то отношение напряжения принятого сигнала к соответствующим образом сдвинутому току дало бы комплексный ПИ по свободному полю $\dot{Z}_{\text{св}}(f)$.

IV. ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ КАК СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИМПЕДАНСА ПО СВОБОДНОМУ ПОЛЮ

A. Основная идея

Пример частотной зависимости $|\dot{Z}_{\text{рев}}(f)|$, измеренной в реверберационном поле при излучении ЛЧМ сигнала, приведён на рис. 1. Как видно, импеданс искажён сложной осцилляцией, вызванной суммарным эффектом наложения на прямой сигнал отражённых звуковых волн. Чтобы лучше понять структуру импеданса в реверберационном поле, естественно исследовать его с помощью Фурье анализа,

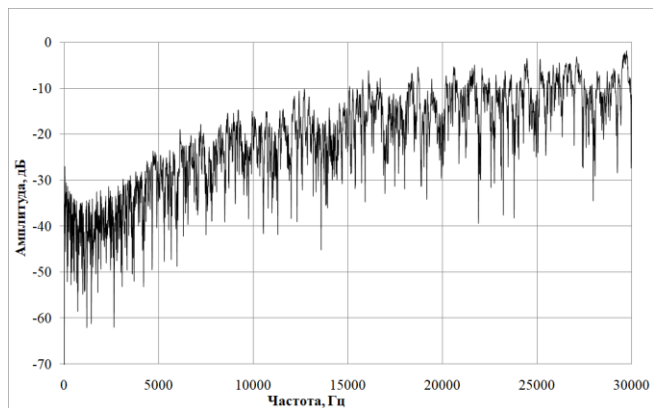


Рис. 1. Амплитуда передаточного импеданса, измеренного в реверберационном поле звуковой волны

то есть, разложить ЧХ импеданса на гармоники, соответствующие отражённым сигналам. Для этого к дискретному импедансу $\dot{Z}_{\text{рев}}(f_n)$ применяют дискретное преобразование Фурье (DFT):

$$\dot{V} = \text{DFT}[\dot{Z}_{\text{рев}}].$$

Модуль функции $|\dot{V}|$ называют *кепстром*. Областью определения *кепстра* $|\dot{V}(\tau)|$ являются задержки $\tau \in [0, F_d / s]$ времени прихода отражённых сигналов относительно момента прихода прямого сигнала t_0 . Таким образом, физическим смыслом *кепстра* является распределение энергии отражённых волн по времени их прихода до приёмника относительно момента t_0 . При этом нулевой гармонике будет соответствовать прямой сигнал, не искажённый отражениями, и, следовательно, импеданс по

свободному полю. Пример графика *кепстра* изображён на рис. 2.

Идея получения импеданса по свободному полю $\dot{Z}_{\text{св}}(f)$ из импеданса $\dot{Z}_{\text{рев}}(f)$ заключается в выделении из *кепстра* нулевой гармоники и удалении остальных гармоник. Сделать это можно, построив импульсную характеристику (ИХ) $h(f)$ цифрового фильтра, которая свяжет $\dot{Z}_{\text{рев}}(f)$ и $\dot{Z}_{\text{св}}(f)$ с помощью операции свертки $\dot{Z}_{\text{св}} = h * \dot{Z}_{\text{рев}}$:

$$\dot{Z}_{\text{св}}(f) = \int_{-\Delta f_{\Phi}/2}^{\Delta f_{\Phi}/2} h(f') \dot{Z}_{\text{рев}}(f - f') df', \quad (1)$$

где Δf_{Φ} – полоса усреднения и предполагается, что $h(f)$ действительная функция, а $\dot{Z}_{\text{рев}}(f) = \dot{Z}_{\text{рев}}(-f)^*$. Другими словами, функция $h(f)$ будет являться сглаживающим окном, которое скользящим усреднением очистит ЧХ импеданса от осцилляций.



Рис. 2. Кепстр, построенный из передаточного импеданса, измеренного в реверберационном поле

B. Алгоритм построения цифрового фильтра

Алгоритм построения цифрового фильтра следующий. Для начала в области задержек выбирают периодическую с периодом $\tau_d = F_d / s$ (аналог частоты дискретизации из спектрального анализа) комплексную функцию $\dot{H}(\tau)$ (так называемую *кепстральную* характеристику (КХ) фильтра). Простым выбором является функция с модулем $H(\tau) = |\dot{H}(\tau)|$ в виде прямоугольного окна высотой 1, центром в $\tau = 0$ и полушириной $\tau_c < \tau_1$, где τ_1 – это задержка прихода первого отражения. График модуля $\dot{H}(\tau)$ изображён на рис. 3 (см. график а)). Пусть также $\dot{H}(\tau)$ имеет линейную фазовую характеристику $\Phi(\tau) = -M\tau / \tau_d$, где M – натуральное число.

Комплексную *кепстральную* характеристику фильтра $\dot{H}(\tau) = H(\tau) \exp(2\pi j \Phi(\tau)) = H(\tau) \exp(-2\pi j M \tau / \tau_d)$ (2)

как периодическую функцию можно разложить в ряд Фурье:

$$\dot{H}(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \exp(-2\pi j k \tau / \tau_d), \quad (3)$$

где коэффициенты $h(k)$ образуют дискретную ИХ фильтра. Её коэффициенты находятся по формуле:

$$h(k) = \frac{1}{\tau_d} \int_{-\tau_d/2}^{\tau_d/2} H(\tau) \exp(2\pi j k \tau / \tau_d) d\tau.$$

Вычисление интеграла, учитывая, что $H(\tau) = 0$ при $|\tau| > \tau_c$, даёт:

$$h(k) = \frac{1}{\pi(k-M)} \sin\left(\frac{2\pi\tau_c}{\tau_d}(k-M)\right).$$

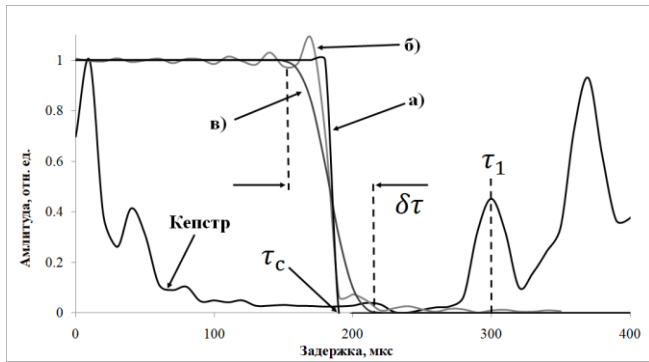


Рис. 3. Амплитудно-кепстральные характеристики: а) прямоугольное окно; б) прямоугольное окно, искажённое эффектом Гиббса; в) сглаженное окно

Таким образом, дискретная ИХ $h(k)$ имеет вид sinc-функции $\text{sinc}(k) \equiv \frac{\sin(\pi k)}{\pi k}$, поэтому фильтр такого вида в теории обработки сигналов называют *sinc-фильтром*. График функции $h(k)$ изображён на рис. 4 (график а)). Как видно, областью определения $h(k)$ являются все отчёты k от $-\infty$ до $+\infty$, что неудобно для цифровых вычислений. Поэтому вторым шагом является преобразование $h(k)$ в конечную ИХ $h_{\text{кон}}(k)$. А именно, область её определения ограничивают отрезком, например, $[0, N_{\text{ф}}]$:

$$h_{\text{кон}}(k) = 0, k \notin [0, N_{\text{ф}}], h_{\text{кон}}(k) = h(k), k \in [0, N_{\text{ф}}].$$

Функция $h_{\text{кон}}(k)$ будет удовлетворять разложению (3) не при всех M . Ограничение области определения $h(k)$ отрезком $[0, N_{\text{ф}}]$, означает, что суммирование по k в (3) будет происходить от 0 до $N_{\text{ф}}$. Подставим (2) в левую

часть формулы (3) и у получившегося уравнения приравняем друг другу отдельно действительную и мнимую части левой и правой сторон. Получим два уравнения, которые после перекрестного перемножения правой стороны 1-го уравнения на левую сторону 2-го уравнения и правой стороны 2-го уравнения на левую сторону 1-го уравнения, дадут следующее уравнение на M :

$$\sum_{k=0}^{N_{\text{ф}}} h_{\text{кон}}(k) \sin(2\pi(k-M)\tau / \tau_d) = 0.$$

Чтобы первое слагаемое с $k=0$ сократилось с последним с $k=N_{\text{ф}}$, второе с предпоследним и т.д., должны выполняться следующие условия:

$$M = N_{\text{ф}} - M, h_{\text{кон}}(k) = h_{\text{кон}}(N_{\text{ф}} - k).$$

Отсюда получаем условие симметричности ИХ, а кроме того $M = N_{\text{ф}} / 2$. Число $N_{\text{ф}}$ называется *порядком фильтра*.

Заметим, что ИК $h_{\text{кон}}(k)$ есть исходная $h(k)$ умноженная на прямоугольное окно $\Pi(k)$ длиной $N_{\text{ф}} + 1$ и центром, совпадающим с центром симметрии $h(k)$: $h_{\text{кон}}(k) = h(k)\Pi(k)$. Построенная по этой $h_{\text{кон}}(k)$ амплитудно-кепстральная характеристика (АКХ) $H_{\text{кон}}(\tau)$ по формуле (3) будет прямоугольным окном, свёрнутым с Фурье образом окна $\Pi(k)$, что приведёт к искажению АКХ пульсациями и выбросами (см. рис. 3, график б)). Это так называемое явление (эффект) Гиббса. Такие пульсации неизбежно исказят ПИ по свободному полю после применения операции свертки (1). Поэтому $h(k)$ необходимо умножить на специально подобранную сглаживающую оконную функцию $w(k)$ для того, чтобы получить ИХ с быстро спадающими до нуля концами в окрестности границ отрезка $[0, N_{\text{ф}}]$. Применение оконной функции $w(k)$ подавляет пульсации на АКХ, однако увеличивает ширину полосы перехода фильтра $\delta\tau$ в окрестности точек $\pm\tau_c$ (см. рис 3, график в)). Ширину полосы перехода $\delta\tau$ можно оценить по следующей формуле $\delta\tau = \alpha\tau_d / N_{\text{ф}}$ [6], где число α зависит от выбранного сглаживающего окна (например, для окна Блэкмена $\alpha = 5,5$). Ещё одним важным параметром фильтра является ширина главного лепестка sinc-функции, которая определяется величиной обратной к ширине кепстрального окна $1/(2\tau_c)$. Эту ширину можно принять за эффективную полосу усреднения фильтра $\Delta f_{\text{ф}} \sim 1/(2\tau_c)$. Таким образом, конечную сглаженную характеристику $h_w(k)$ (см. рис. 4, график б)) определим как

$$h_w(k) = h(k)w(k),$$

или в явном виде

$$h_w(k) = \frac{2w(k)}{\pi(2k - N_\phi)} \sin\left(\frac{\pi\tau_c}{\tau_d}(2k - N_\phi)\right). \quad (4)$$

В итоге комплексную ЧХ ПИ по свободному полю можно вычислить из дискретного варианта формулы (1), выполнив линейную свертку $h_w(k)$ и $\dot{Z}_{\text{рев}}(f_n)$.

$$\dot{Z}_{\text{св}}(f_n) = \sum_{k=0}^{N_\phi} h_w(k) \dot{Z}_{\text{рев}}(f_n - (k - N_\phi/2)/\tau_d).$$

При этом предполагаем, что связь между дискретной ИХ $h(k)$ и непрерывной ИХ $h(f)$ следующая: $h(f) = h(k)\delta(f - (k - N_\phi/2)/\tau_d)$. Кроме того, при $n < 0$

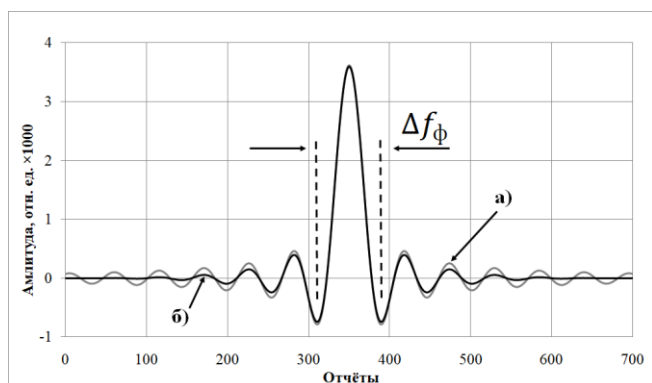


Рис. 4. Импульсные характеристики; а) sinc-функция на конечном отрезке; б) sinc-функция, сглаженная окном Блэкмена

$$\dot{Z}_{\text{рев}}(f_n) = \dot{Z}_{\text{рев}}(-f_n)^*,$$

а при $n > N$

$$\dot{Z}_{\text{рев}}(f_n) = \dot{Z}_{\text{рев}}(f_N - f_n)^*.$$

С. Связь между бассейном, гидрофоном и фильтром

Перечислим ещё раз важные параметры sinc-фильтра. Задержка τ_c — определяет ширину кепстрального окна, и, следовательно, эффективную полосу усреднения фильтра Δf_ϕ . Порядок фильтра N_ϕ — определяет число отчётов ИХ $h(k)$. Ширина полосы перехода $\delta\tau = \alpha N / (\Delta F N_\phi)$, которая зависит от параметров принимаемого и излучаемого сигналов: числа N отчётов в дискретном ПИ $\dot{Z}_{\text{рев}}(f_n)$ и частотной ширины ЛЧМ сигнала ΔF . Рассмотрим теперь, какие ограничения накладывают на эти параметры размеры бассейна и используемые при калибровке гидрофоны. Эти ограничения хорошо видны из рис. 3. Как уже отмечалось, задержка τ_1 обратно пропорциональна размерам бассейна. Кроме того, ширина нулевой

гармоники в кепстре частотного отклика пары излучатель-приёмник обратно пропорциональна ширине частотного диапазона излучателя и приёмника. Т.е. чем более узкополосные гидрофоны используются в процедуре калибровки, тем более широкая нулевая гармоника получается в кепстре. Очевидно, что начиная с некоторых размеров бассейна, нулевая гармоника и гармоники первых отражений могут перекрываться. Это будет препятствовать адекватному использованию фильтра в бассейне малых размеров. К сказанному выше, добавим, что ширина переходной полосы фильтра $\delta\tau$ должна быть достаточно узкой, чтобы кепстральное окно фильтра не перекрывало гармоники отражений и не подавляло нулевую гармонику.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА ФИЛЬТРАЦИИ

Для экспериментальной проверки возможности калибровать низкочастотные гидрофоны в незаглушенном бассейне малых размеров, а также апробации предлагаемого метода фильтрации, была собрана измерительная установка. Эта установка, реализующая калибровку гидрофонов методом взаимности [5], состоит из следующих функциональных блоков.

1) **ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ БАСЕЙН.** Незаглушенный бассейн из стекла размерами 1,5×1 м (длина × ширина × высота).

2) **ИЗЛУЧАЮЩИЙ ТРАКТ.** Цифровые широкополосные сигналы записываются в память генератора сигналов произвольной формы Tabor WW1072. С первого канала генератора эти сигналы, преобразованные в аналоговую форму тока возбуждения, могут подаваться через усилитель мощности на гидрофон-излучатель; со второго канала генератора эти сигналы могут подаваться через усилитель мощности на обратимый преобразователь.

3) **ПРИЁМНЫЙ ТРАКТ.** Принимаемые сигналы с калибруемого гидрофона или обратимого преобразователя (во время режима его работы в качестве приёмника) поступают на усилитель по напряжению SR560, далее оцифровываются осциллографом LeCroy WR 44Xi-A и записываются в память персонального компьютера (ПК).

4) **БЛОК КОММУТАЦИИ.** Осуществляет переключение режимов работы обратимого преобразователя с излучения на приём и наоборот.

5) **Система подвеса гидрофонов** в бассейне и их позиционирования друг относительно друга, выполненная на основе линейных и поворотных трансляторов фирмы Standa, управляемых с ПК через контроллер шаговых двигателей.

6) **ПЕРСОНАЛЬНЫЙ КОМПЬЮТЕР.** Дальнейшая обработка сигналов, в том числе цифровая фильтрация, проводится на ПК с помощью специально разработанного программного обеспечения.

Отметим, что прототипом данной установки послужила установка из состава эталона ГЭТ 55-2017, хранящая и передающая единицу звукового давления в воде в частотном диапазоне от 160 кГц до 1 МГц. Поэтому на данной установке также можно проводить калибровку высокочастотных гидрофонов.

Опытным путём было установлено, что для бассейна с габаритами $1,5 \times 1 \times 1$ м оптимально использовать в качестве излучателя и обратимого преобразователя гидрофоны, с рабочим диапазоном частот от 3 до 100 кГц. В качестве таких гидрофонов в экспериментах применялись гидрофоны, выполненные в виде пьезокерамических сфер диаметром 20 мм. На собранной установке была осуществлена калибровка на широкополосном гармоническом ЛЧМ сигнале двух гидрофонов: эталонного гидрофона ТС4034 фирмы Reson (погрешность 1 дБ) и рабочего гидрофона ГИ55 ФГУП «ВНИИФТРИ» (погрешность 1,5 дБ). Для цифрового ЛЧМ сигнала, записываемого в память генератора, были подобраны следующие параметры: длительность $T = 1$ с, частотная полоса $\Delta F = 100$ кГц, количество точек $N = 2,5 \cdot 10^6$, начальная частота $f_0 = 0$. Принимаемые временные сигналы когерентно накапливались осциллографом для подавления шумовой помехи. Частота их дискретизации составила $F_d = 2,5 \cdot 10^6$ МГц. Поэтому дискретные ПИ измерялись с очень малым шагом по частоте: $\Delta f = 1/\tau_d = 0,04$ Гц. Для бассейна, используемого в этих экспериментах, задержка прихода первого отражения $\tau_1 \geq 300$ мкс. Ширина нулевой гармоники кепстров, построенных по частотным зависимостям ПИ пар гидрофонов, используемых в экспериментах, не превышала 100 – 120 мкс. Отсюда получаем, что параметром τ_c должен быть больше 120 мкс, но меньше 300 мкс. В дальнейшем, для фильтрации всех измеряемых импедансов было выбрано значение $\tau_c = 180$ мкс, что дало эффективную полосу усреднения $\Delta f_{\phi} \approx 2778$ Гц. Порядок фильтра N_{ϕ} выбирался из условия, чтобы ширина полосы перехода фильтра δt не превышала 100 мкс. Кроме того число N_{ϕ} должно быть меньше числа отчётов в ПИ N . Заметим, что шаг по частоте 0,04 Гц явно избыточен для практики, а кроме того, при этом значении получается очень большой порядок фильтра $N_{\phi} \sim 10^6$, что требует больших вычислительных мощностей ПК. Поэтому оптимальным является увеличение шага частотной сетки, например, до 100 Гц, т.е. проводится прореживание дискретных данных. При частотном шаге 100 Гц порядок фильтра был выбран равным $N_{\phi} = 700$ отчётов, отсюда ширина полосы перехода равнялась удовлетворительному значению $\delta t \approx 78$ мкс. Таким образом, для применения фильтрации был построен фильтр по формуле (4) с заданными выше параметрами τ_c , N_{ϕ} и τ_d . В качестве сглаживающего окна было выбрано окно Блэкмена

$$w(k) = 0,42 + 0,5 \cos\left(\pi \frac{2k - N_{\phi}}{N_{\phi}}\right) + 0,08 \cos\left(2\pi \frac{2k - N_{\phi}}{N_{\phi}}\right).$$

Результаты калибровки гидрофонов ТС4034 (от 4 до 80 кГц) и ГИ55 (от 3 до 80 кГц) на широкополосном гармоническом ЛЧМ сигнале представлены на рис. 5 и 6 (непрерывные линии). Данные кривые были получены усреднением по нескольким измерениям. СКО значений чувствительности для ТС4034 не превышало 0,3 дБ с 3 до 5,5 кГц и 0,1 дБ на остальных частотах; для ГИ55 СКО не

превышало (0,1-0,15) дБ на всех частотах. Относительно высокое СКО на низких частотах у ТС4034 связано с большим отношением шум/сигнал на этих частотах.

Для оценки погрешности предлагаемого метода калибровки при излучении широкополосного сигнала эти гидрофоны были откалиброваны в большом бассейне ($10 \times 6 \times 6$ м) на первичном эталоне единицы звукового давления в диапазоне частот от 1 до 200 кГц при излучении тонального импульса. Результаты калибровки приведены на рис. 5 и 6 (точки). Погрешность измерения чувствительности гидрофонов на эталоне не превышает 0,3 дБ. Погрешность гидрофонов как средств измерения составляет для эталонного ТС4034 – 1 дБ, для рабочего ГИ55 – 1,5 дБ. Сравнение значений на непрерывной кривой (широкополосный сигнал) со значениями в точках (тональный импульс) показало, что отклонения значений чувствительности, измеренной двумя разными способами, не превышает 0,3-0,4 дБ как для ТС4034, так и для ГИ55. Данные отклонения меньше погрешности измерений.

Таким образом, из сравнительного анализа частотной зависимости чувствительности гидрофонов можно сделать вывод, что применённая методика подавления отражений даёт хорошие результаты и по точности сравнима с традиционным методом калибровки по свободному полю. Кроме того, метод фильтрации позволил снизить минимальную частоту калибровки в бассейне с габаритными размерами $1,5 \times 1 \times 1$ м до 3-4 кГц.

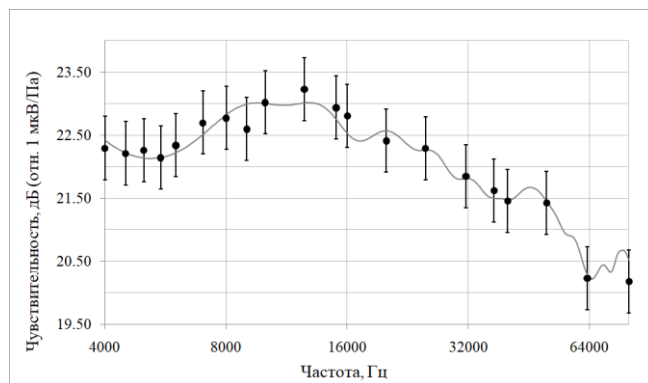


Рис. 5. Чувствительность гидрофона Reson TC4034: непрерывная линия — при излучении широкополосного сигнала; точки — на тональном импульсе

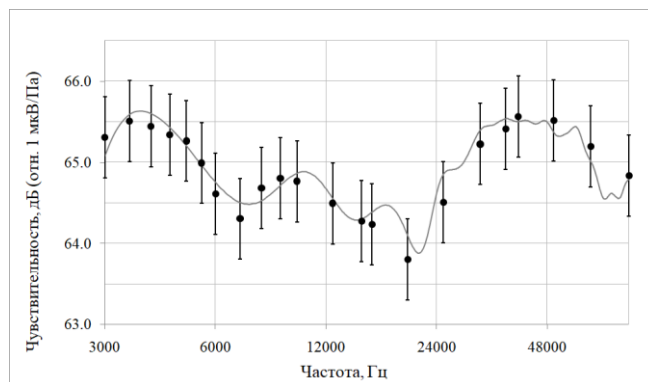


Рис. 6. Чувствительность гидрофона ГИ55: непрерывная линия — при излучении широкополосного сигнала; точки — на тональном импульсе

VI. Выводы

В заключении перечислим основные итоги выполненной работы.

- Обоснована возможность применения метода цифровой фильтрации для подавления влияния ревербераций при калибровке приёмников звукового давления в незаглушенном бассейне на широкополосном длительном сигнале.
- Построен цифровой фильтр в виде сглаженной sinc-функции, дано описание основных его параметров. Указаны особенности применения фильтра при калибровке гидрофонов в бассейне малых размеров.
- Описана экспериментальная измерительная установка, в которой проводилась апробация метода фильтрации.
- Приведены результаты калибровок гидрофонов Reson TC4034 и ГИ55 в незаглушенном бассейне размерами $1,5 \times 1 \times 1$ м в частотном диапазоне от 3 до 80 кГц. Дано сравнение этих результатов с результатами калибровки гидрофонов на тональном импульсе. Разница между результатами калибровок двумя методами не превысила 0,3-0,4 дБ, что говорит о хорошем согласовании предлагаемого метода с традиционным методом калибровки по свободному полю.
- Обоснована возможность калибровки гидрофонов по свободному полю с минимальной частоты 3-4 кГц в незаглушенном бассейне малых размеров.

На основе результатов работы предлагается сделать следующий вывод: собранную экспериментальную установку, реализующую стандартный метод взаимности в бассейне размерами $1,5 \times 1 \times 1$ м с применением широкополосных сигналов и цифровой фильтрации, можно использовать в качестве макета рабочего эталона единицы звукового давления в воде в частотном диапазоне от 4 кГц до 1 МГц с целью проведения дальнейших испытаний предложенного метода. Целесообразно создание на основе данного макета опытного образца рабочего эталона и исследование его метрологических характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, "Два подхода к градуировке гидрофонов по полю при непрерывном излучении в незаглушенном бассейне," Измерительная техника, № 12, Сс. 47–51, 2008.
- [2] А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, "Градуировка гидрофонов по полю при непрерывном излучении в реверберационном бассейне," Акустический журнал, Т. 55, № 6, Сс. 727-736, 2009.
- [3] С.С. Наумов, "Метод спектрометрии временных задержек в натуральных гидроакустических измерениях," Автореф. дис., Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского, 2005, 22 с.
- [4] Н.Г. Щерблюк, "Измерение трёхмерных характеристик направленности гидрофонов на ЛЧМ сигналах," Материалы Шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2016)». Санкт-Петербург, АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Сс. 214-218, 2016.
- [5] Р.Дж. Боббер, "Гидроакустические измерения," пер. с англ. под ред. А. Н. Голенкова, М.: Мир, 1974.
- [6] Э. Айфичер, Б. Джервис, "Цифровая обработка сигналов. Практический подход," М.: Вильямс, 2004.

Измерение коэффициентов отражения материалов в камерах малого объема установок для градуировки гидроакустических преобразователей

А. И. Щелкунов, Г. С. Некрич

НИО-5 «Научно-исследовательское отделение метрологии гидрофизических измерений»

ФГУП «ВНИИФТРИ»

Менделеево, Россия

vniiftri@list.ru

Аннотация — В работе рассматривается, как, не имея специализированного акустического интерферометра, можно произвести качественные оценки акустических свойств образцов материалов, используя широко распространённые измерительные камеры установок для низкочастотной градуировки гидрофонов и векторных приёмников.

Ключевые слова — акустический интерферометр; труба Кундта; коэффициент отражения; коэффициент поглощения; акустические свойства материала

I. ВВЕДЕНИЕ

При создании гидроакустической аппаратуры и специального измерительного оборудования применяется широкий спектр материалов с различными свойствами. Очень важно бывает знать акустические свойства этих материалов. Так при создании специальных заглушенных бассейнов необходимо подбирать материалы покрытия с лучшими в рабочем диапазоне частот коэффициентами поглощения, при создании обтекателей – учитывать коэффициент пропускания материала. Условия, в которых должны работать эти материалы, охватывают широкий диапазон давлений, температур, частот.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В акустике для исследования акустических свойств небольших образцов материалов широко используются акустические интерферометры, так называемые трубы Кундта. С их помощью определяют такие характеристики образцов, как акустический импеданс, коэффициенты от-

ражения и поглощения звука материалом. Принцип их действия основан на интерференции плоских акустических волн, распространяющихся в прямом и обратном (отражённая от исследуемого образца волна) направлении. Конструктивно труба Кундта представляет собой кусок трубы 1 (рис. 1), на одном конце которой установлен излучатель 2 поршневого типа. Чаще всего в его роли выступает электродинамический излучатель. На противоположном конце монтируется эталонный отражатель 3 или исследуемый образец 4. Эталонный отражатель должен иметь максимально большой акустический импеданс. Генератор 5 возбуждает излучатель напряжением звуковой частоты, в результате чего вдоль оси акустической трубы возникает система плоских стоячих волн, которая представляет собой суперпозицию излучаемой и всех многократно отражённых волн между излучателем и исследуемым образцом. Для исследования пространственного распределения результирующего звукового давления в акустической трубе вдоль её оси на тонкой штанге 7 перемещается миниатюрный гидрофон 6, сигналы с которого усиливаются линейным широкополосным усилителем 8, а затем измеряются цифровым анализатором сигналов.

В измерительной акустической трубе проще всего измерить звукопоглощение небольших образцов материалов и конструкций при нормальном падении звука на них. Тогда величина звукопоглощения будет определяться по разности амплитуд в узлах и пучностях стоячей звуковой волны, установившейся между излучателем и образцом исследуемого звукопоглощающего материала (рис. 2).

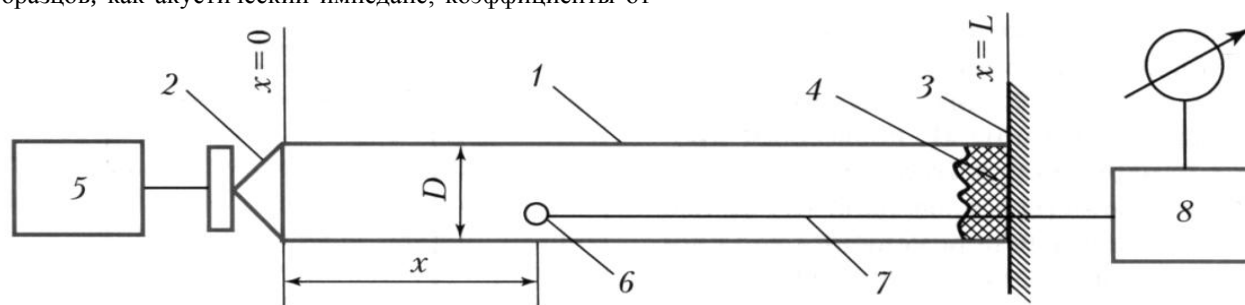


Рис. 1. Конструкция трубы Кундта

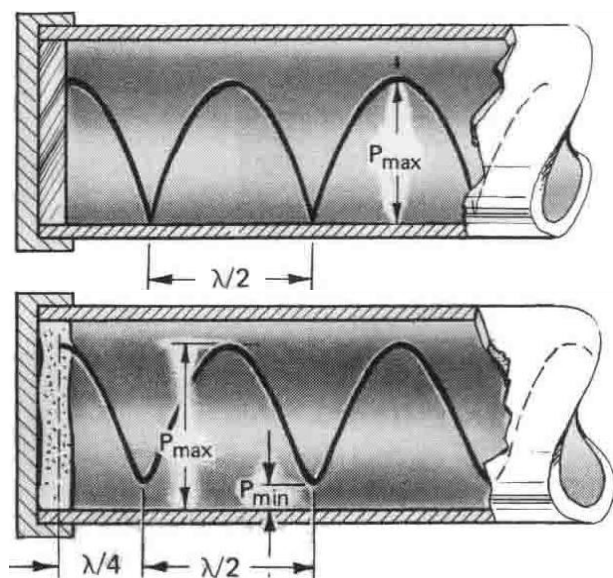


Рис. 2. Вверху – установившаяся звуковая волна в акустической трубе при коэффициенте отражения 100 %, внизу – при коэффициент отражения менее 100 %

Если обозначить отношение максимального и минимального значений звукового давления в стоячей волне внутри акустической трубы для каждой данной частоты через $n = P_{\max} / P_{\min}$, то коэффициент звукопроникновения образца материала при нормальном падении звуковой волны будет равен $K_{\text{прн}} = 4 / (2 + n + 1/n)$ [1].

Во ФГУП «ВНИИФТРИ» существует акустический интерферометр, рассчитанный на измерение акустических свойств материалов в воздухе в диапазоне частот от 40 Гц до 4 кГц. Но его конструкция не позволяет проводить измерения в жидких средах. В то же время в нашем распоряжении имеется обширный парк гидроакустической аппаратуры, имеющей в своем составе измерительные камеры конструктивно схожие с трубой Кундта [2,3]. Они позволяют, практически без изменения конструкции, с использованием несложной дополнительной оснастки, проводить исследования акустических свойств образцов материалов в них.

Для дальнейших исследований были отобраны три измерительные камеры: КИДНЧ из состава рабочего эталона единицы звукового давления в водной среде в диапазоне частот 1 - 2000 Гц (РЭДНЧ), КИКС из состава установки ЭУ-1 ГЭТ 55-2017 и КИС-СД из состава установки Э-2 ГЭТ 55-2017. Диапазон рабочих частот акустического интерферометра, построенного на основе этих камер, определяется размерами акустической трубы - измерительной камеры. Его граничные частоты $f_{\min} = v/4L$ и $f_{\max} = v/2D$, где v - фазовая скорость звука в среде, заполняющей камеру, D - диаметр измерительной камеры, L - её длина [4]. Расчетные граничные частоты для этих измерительных камер приведены в табл. 1.

Несмотря на то, что камера КИС-СД имеет наиболее широкий диапазон граничных частот, использовать её в качестве акустического интерферометра несколько затруднительно из-за верхнего расположения динамического излучателя и наличия воздушной полости под ним. Аналогичными недостатками обладает и измерительная камера КИДНЧ. Оптимальным было признано использо-

вание измерительной камеры КИКС, имеющей нижнее расположение излучателя. При таком расположении излучателя верхняя кромка измерительной камеры остаётся открытой, что имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, границу перехода вода-воздух можно использовать в качестве эталонного отражателя, имеющего коэффициент отражения близкий к единице. Во-вторых, на открытом конце удобно располагать исследуемый образец материала, вырезанный по форме проёма верхнего торца камеры, и контролировать отсутствие воздушной прослойки между ним и поверхностью воды. В-третьих, при таком расположении не требуется никаких уплотнений для штанги с гидрофоном, сканирующим распределение результирующего звукового давления в измерительной камере вдоль вертикальной оси.

ТАБЛИЦА 1 ГРАНИЧНЫЕ ЧАСТОТЫ

Камера	$f_{\min}$, Гц	$f_{\max}$, кГц
КИДНЧ	535	5,0
КИКС	535	3,75
КИС-СД	625	10,7

Ниже в табл. 2 приведены результаты измерений коэффициентов проникновения для различных материалов на частоте 3 кГц, полученные при использовании измерительной камеры КИКС в качестве акустического интерферометра.

ТАБЛИЦА 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Показатель	Отражающий материал			
	Поверхность воды	Вспененный полиэтилен толщиной 2 см	Пенопласт толщиной 1,5 см	Поролон водозаполненный толщиной 1,5 см
Коэффициент звукопроникновения, $K_{\text{прн}}$	0,05	0,06	0,08	0,24
Коэффициент отражения, $K_{\text{отр}}$	0,95	0,94	0,92	0,76

Учитывая, что $K_{\text{отр}} + K_{\text{прн}} = 1$, легко определить коэффициенты отражения для данных материалов. Видно, что полученные результаты неплохо согласуются с теорией. В частности, коэффициент отражения от раздела вода-воздух близок к единице.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, не имея специализированного измерительного оборудования, но обладая конструктивно схожими с акустическим интерферометром (трубой Кундта) камерами, широко применяемыми в составе установок для низкочастотной градуировки гидрофонов и векторных приёмников, можно провести качественные и количественные оценки таких акустических свойств образцов материалов, как коэффициент отражения и поглощения. В то же время измерения в гидроакустических трубах, хотя и позволяют оценить акустические свойства различных материалов, но не дают точной оценки изоляции и отра-

жения этими материалами и конструкциями из них подводного звука в реальных условиях, так как в образцах материалов больших размеров и конструкций из них, в отличие от малых образцов, возможно возникновение различных типов изгибных и поверхностных волн, а также других явлений, влияющих на звукоизоляцию и звукоотражение. Очевидно, такие измерения могут быть выполнены только в гидроакустическом измерительном бассейне достаточного размера или в натурных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Клюкин И.И. Акустические измерения в судостроении / Клюкин И.И., Колесников А.Е.. - Л.: Судостроение, 1982, 3-е изд. - С. 134-135.
- [2] Щелкунов А.И. Установки ФГУП «ВНИИФТРИ» для низкочастотной градуировки гидрофонов // VI международная научно-техническая конференция «Судометрика 2016». – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. - С. 162-164.
- [3] Исаев А.Е. Эталонные установки для воспроизведения и передачи единицы колебательной скорости водной среды в диапазоне частот от 5 до 10000 Гц / Исаев А.Е., Матвеев А.Н, Некрич Г.С., Сильвестров С.В. // Вестник метролога. - 2017. - № 1. - С. 14-20.
- [4] Химунин А. С. Интерферометр акустический // Большая российская энциклопедия. Том 11. Москва, 2008. – С. 466.

Определение метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений с помощью компаратора лазерного интерференционного

В. П. Филиппов, З. В. Фомкина
Отдел геометрических измерений
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
г. Санкт-Петербург, Россия
v.p.philippov@vniim.ru, z.v.fomkina@vniim.ru

Аннотация — В докладе на примере вспомогательного устройства для определения метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений рассматривается возможность применения компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового из состава Государственного первичного эталона единицы длины — метра ГЭТ 2-2010 для передачи единицы длины специализированным высокоточным средствам измерений.

Ключевые слова — компаратор лазерный интерференционный; передача единицы длины; высокоточные датчики перемещений

I. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия человечество значительно совершенствовало свои технические средства и инфраструктуру. По мере всё большего усложнения создаваемых изделий, непрерывно повышаются и требования к их безопасности и качеству производства, а также требования к точности измерений. В современных условиях, когда практически все аспекты жизнедеятельности общества критически зависят от исправного функционирования технических систем, значение достоверности результатов измерений, обеспечивающих их работу, нельзя переоценить.

Важно, что для системы метрологического обеспечения описанные выше тенденции характеризуются также стремительно расширяющейся номенклатурой различных специальных средств измерений с высокими метрологическими характеристиками. При этом ожидается, что в будущем данный процесс будет идти ещё более интенсивно — будет появляться всё больше специализированных высокоточных средств измерений, требующих установления прослеживаемости к первичным эталонам единиц величин.

Поэтому помимо совершенствования метрологических характеристик эталонов важной задачей является проведение работ по адаптации эталонов к передаче единиц специализированным средствам измерений.

Примером такой работы является разработка специализированного вспомогательного устройства для определения метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений из состава комплексов КМ-Дельта-СМ на базе компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового из состава Государственного первичного эталона единицы длины — метра ГЭТ 2-2010.

Комплексы мониторинга линейных деформаций восьмиканальные КМ-Дельта-8-СМ применяются на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции и предназначены для измерений деформаций шпилек турбин гидроагрегатов и подобных им элементов резьбовых соединений. Принцип действия комплекса основан на измерении линейных перемещений торцов шпилек относительно калибровочных стержней, установленных внутри шпилек, при помощи датчиков линейных перемещений ЛИР-ДА13Б.

II. КОМПАРАТОР ЛАЗЕРНЫЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ ИЗ СОСТАВА ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ — МЕТРА ГЭТ 2-2010

Компаратор лазерный интерференционный тридцатиметровый из состава Государственного первичного эталона единицы длины — метра ГЭТ 2-2010 (далее компаратор) предназначен для передачи единицы длины высокоточным средствам измерений [1,2] Основными составляющими частями компаратора являются:

- лазерная измерительная система;
- оптико-механическая система компаратора;
- система контроля параметров окружающей среды, таких как температура, давление и влажность;
- программное обеспечение.

Основные метрологические характеристики компаратора приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПАРАТОРА

Составляющие погрешности	Значение погрешности
Погрешность определения длины волны в вакууме, $\theta_{\lambda_{vac}}$	$5 \cdot 10^{-9} \cdot L^*$
Погрешность определения поправки, связанной с ошибкой Аббе, $\theta_{C_{Abbe}}$	0,0002 мкм
Погрешность определения поправки, связанной с ошибкой из-за отклонения от параллельности между осью лазерного луча компаратора и осью измеряемой объекта, $\theta_{C_{cos}}$	$1,7 \cdot 10^{-10} \cdot L$
* – L – измеряемая длина, м.	

Внешний вид компаратора приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид компаратора
(1 – система лазерная измерительная XL-80; 2 – направляющие; 3 – основание; 4 – каретка; 5 – узел привода каретки с шаговым двигателем; 6 – блок питания шагового двигателя; 7 – блок управления шаговым двигателем; 8 – приемник радиосигнала; 9 – модуль видеозахвата; 10 – система обработки изображения; 11 – блок измерений температуры)

III. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОТОЧНЫХ ДАТЧИКОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Вспомогательное устройство для калибровки высокоточных датчиков перемещений, входящих в состав комплексов мониторинга линейных деформаций восьмиканальных КМ-Дельта-8-СМ или аналогичных по конструкции, принципу действия и метрологическим характеристикам, предназначено для установки датчика на компараторе и обеспечения перемещений измерительного стержня датчика.

Внешний вид комплекса КМ-Дельта-8-СМ приведен на рис. 2.

Внешний вид вспомогательного устройства для определений метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений приведен на рис. 3.



Рис. 2. Внешний вид комплекса мониторинга линейных деформаций восьмиканальных КМ-Дельта-8-СМ

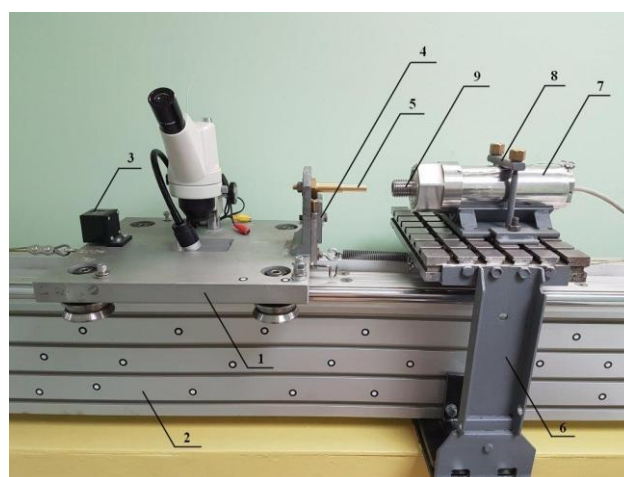


Рис. 3. Вспомогательное устройство для определения метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений
(1 – каретка компаратора; 2 – направляющие компаратора; 3 – отражатель интерферометра; 4 – регулируемая конструкция для закрепления штока; 5 – шток; 6 – платформа для закрепления датчика; 7 – датчик измерения перемещений; 8 – приспособления для закрепления датчика; 9 – измерительный стержень датчика)

Описание и принцип работы вспомогательного устройства

Вспомогательное устройство состоит из двух модулей. Первый модуль состоит из платформы для закрепления датчика (6), на которой при помощи приспособления для закрепления датчика (8) обеспечивается статичное положение исследуемого датчика (7). Платформа устанавливается на одну из опор компаратора. Второй модуль конструктивно выполнен в виде штока, с помощью которого задают перемещение измерительного стержня датчика. Шток закреплен в специальной регулируемой конструкции (4) и установлен на подвижной каретке компаратора (1). Регулируемая конструкция позволяет установить шток соосно измерительному стержню датчика. В начальной точке измерений с помощью привода каретки обеспечивается соприкосновение штока (5) и измерительного стержня датчика (9).

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения перемещений датчиков производят с помощью измерительной системы компаратора. Для этого с помощью шагового двигателя каретки задают перемещение штока. Затем одновременно снимают показания с измерительной системы компаратора и с датчика. Абсолютную погрешность перемещений датчиков определяют как разность между показаниями измерительной системы компаратора и датчика. Данную процедуру проводят при прямом и обратном ходе. Абсолютная погрешность перемещений датчиков из состава комплекса КМ-Дельта-8-СМ не превышает ± 5 мкм.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований вспомогательного устройства и проведенных поверок комплексов КМ-Дельта-8-СМ позволяют сделать вывод о пригодности данного приспособления для определения метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений. Следует также отметить, что ранее на базе компаратора был создан ряд специальных приспособлений для определения метрологических характеристик высокоточных лазерных измерительных систем, уровнемеров, тросовых датчиков перемещений и других средств измерений. Результаты работ с использованием данных приспособлений свидетельствуют о высоком потенциале компаратора и возможности применения его для передачи единицы длины узкоспециализированным высокоточным средствам измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.С. Александров, Ю.Г. Захаренко, Н.А. Кононова, Г.И. Лейбенгардт, В.Л. Федорин, К.В. Чекирда. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2-2010 // Измерительная техника. № 6. – 2012. – С. 3 – 7.
- [2] Ю.Г. Захаренко, Н.А. Кононова, Г.И. Лейбенгардт, К.В. Чекирда. Тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор, входящий в состав государственного первичного эталона единицы длины – метра // Измерительная техника. – 2012. – № 5. – с. 22 – 26.

Определение вместимости танков судна типа «Волгонефть» электронно-оптическим методом

А. В. Кондаков

начальник научно-исследовательского отдела метрологического обеспечения измерений уровня
и количества жидких, сыпучих веществ мерами вместимости
ФГУП «ВНИИР»
г. Казань, Россия
420088, ул. 2-я Азинская, д. 7 «а»

Аннотация – Представлены этапы определения вместимости танков наливного судна типа «Волгонефть» с помощью 3D сканера.

Ключевые слова – вместимость, объем

I. ВВЕДЕНИЕ

Приказом Росстандарта от 07.02.2018 г. №256 введена Государственная поверочная схема для средств измерений массы и объема жидкости в потоке, объема жидкости и вместимости при статических измерениях, массового и объемного расходов жидкости (далее - поверочная схема).

В приложении «В» поверочной схемы приведены следующие средств измерений:

- цистерны автомобильные с диапазоном измерений от 2 до 40 м³ и пределами допускаемой относительной погрешности 0,40 %;
- резервуары горизонтальные с диапазоном измерений от 3 до 10000 м³ и пределами допускаемой относительной погрешности от 0,20 % до 0,50 %;
- резервуары вертикальные с диапазоном измерений от 100 до 160000 м³ и пределами допускаемой относительной погрешности от 0,10 % до 0,20 %;
- танки наливных судов с диапазоном измерений от 100 до 100000 м³ и пределами допускаемой относительной погрешности от 0,20 % до 0,50 %;
- цистерны железнодорожные с диапазоном измерений от 50 до 200 м³ и пределами допускаемой относительной погрешности 0,50 % и др.

Поверку указанных средств измерений проводят по соответствующим документам, указанным в стандарте [1]. На сегодняшний день одним из передовых методов измерений объема является лазерное трехмерное сканирование.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Объектом исследования было судно типа «Волгонефть» класса «река-море» предназначенное для транспортировки нефтепродуктов (рис. 1).



Рис. 1. Судно типа «Волгонефть»

На судне типа «Волгонефть» располагается восемь танков в ряд по два танка. Вместимость танков находится в диапазоне от 500 до 800 м³ (рис. 2).



Рис. 2. Танк на судне типа «Волгонефть»

Определение вместимости танков электронно-оптическим методом проводили с применением 3D сканера SURFHASER 25 HSX с регистрационным номером 49151-12 в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Данный сканер имеет предел допускаемого СКО измерений координат до 20 м, равный 0,2 мм (рис. 3).

Для обработки облаков точек сканированных танков применялось программное обеспечение «3D reshaper». Каждый танк сканировался из трех позиций, которые равномерно распределены по длине танка. В результате 3D сканирования получали три отдельных «скана» одного танка изнутри. На каждом отдельном скане удалялись мешающие объекты - «шумы», «тени» и др (рис. 4).

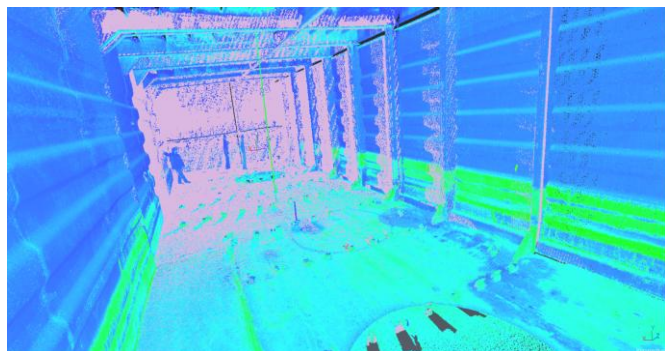


Рис. 3. Облако точек 3D модели танка судна типа «Волгонефть»

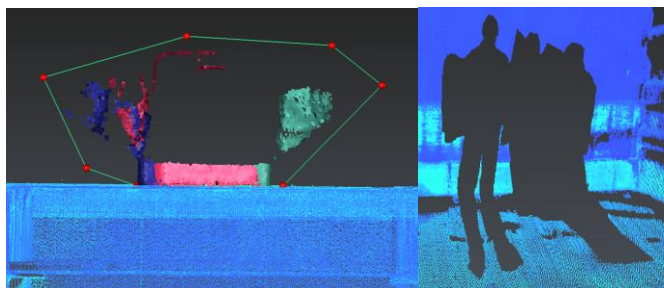


Рис. 4. «Шумы» и «тени» на «скане» танка

Сканы одного танка накладывались друг на друга и объединялись, таким образом, проводилась их «сшивка» (рис. 5).

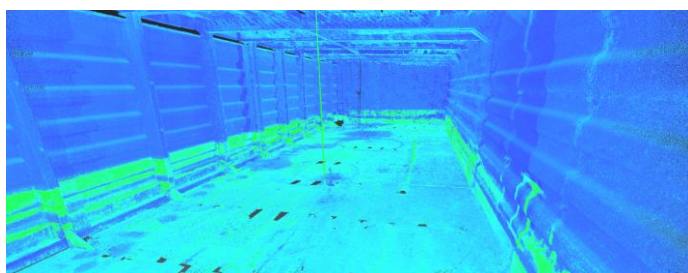


Рис. 5. Сшитый скан танка

Полученный объединенный скан танка с помощью функций программного обеспечения «3D reshaperg» обрабатывался с целью получения объемов на каждом 1 см базовой высоты танка. Базовая высота танка определялась от точки касания грузом рулетки, опущенной через измерительный люк танка, до риски измерительного люка.

Программное обеспечение «3D reshaperg» позволяет наклонять скан продольно и поперечно на необходимый угол. Таким образом, можно имитировать крен и дифферент танка судна. Затем проводили расчет объема с учетом заданного крена и дифферента на каждом сантиметре базовой высоты. В результате получили градуировочную таблицу танка (табл. 1).

Таблица 1. Градуировочная таблица танка

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Дифферент 0 м										
2	Объем жидкости, м³, при крене, равном:										
3	Уровень,	КРЕН, см									Пустота при ровном киле, м
4	м	на ЛЕВЫЙ борт			0	на ПРАВЫЙ борт					
5		40	30	20	10	0	10	20	30	40	
6	0,000	2,966	3,304	3,665	4,032	4,400	4,765	5,123	5,475	5,818	4,910
7	0,010	3,534	3,846	4,186	4,540	4,896	5,252	5,604	5,949	6,288	4,900
8	0,020	4,142	4,430	4,746	5,081	5,423	5,766	6,108	6,445	6,777	4,890
9	0,030	4,791	5,058	5,342	5,654	5,978	6,308	6,637	6,964	7,287	4,880
10	0,040	5,471	5,718	5,975	6,258	6,561	6,874	7,191	7,505	7,818	4,870
11	0,050	6,185	6,408	6,643	6,894	7,172	7,466	7,767	8,069	8,370	4,860
12	0,060	6,934	7,128	7,339	7,564	7,812	8,083	8,366	8,654	8,942	4,850
13	0,070	7,710	7,879	8,063	8,264	8,481	8,726	8,988	9,260	9,616	4,840
14	0,080	8,507	8,654	8,814	8,990	9,182	9,396	9,635	9,887	10,231	4,830
15	0,090	9,316	9,451	9,589	9,742	9,909	10,095	10,306	10,537	10,864	4,820
16	0,100	10,133	10,264	10,385	10,515	10,660	10,820	11,003	11,209	11,519	4,810
17	0,110	10,955	11,086	11,199	11,309	11,433	11,569	11,724	11,904	12,196	4,800
18	0,120	11,782	11,913	12,025	12,123	12,225	12,341	12,470	12,622	12,893	4,790
19	0,130	12,614	12,747	12,858	12,951	13,037	13,131	13,239	13,363	13,611	4,780
20	0,140	13,452	13,585	13,698	13,789	13,865	13,941	14,028	14,128	14,352	4,770
21	0,150	14,294	14,429	14,543	14,634	14,705	14,767	14,834	14,914	15,114	4,760
22	0,160	15,143	15,278	15,392	15,484	15,555	15,608	15,659	15,719	15,899	4,750
23	0,170	15,996	16,133	16,248	16,340	16,410	16,460	16,498	16,540	16,703	4,740
24	0,180	16,855	16,992	17,108	17,201	17,272	17,321	17,352	17,378	17,523	4,730
25	0,190	17,719	17,857	17,973	18,067	18,138	18,187	18,215	18,230	18,360	4,720
26	0,200	18,589	18,728	18,844	18,939	19,010	19,059	19,086	19,094	19,211	4,710
27	0,210	19,465	19,604	19,721	19,815	19,887	19,936	19,963	19,967	20,076	4,700
28	0,220	20,346	20,485	20,602	20,697	20,770	20,819	20,845	20,849	20,952	4,690
29	0,230	21,232	21,372	21,490	21,585	21,657	21,707	21,733	21,736	21,837	4,680
30	0,240	22,124	22,265	22,382	22,477	22,550	22,599	22,625	22,628	22,729	4,670
31	0,250	23,021	23,162	23,280	23,375	23,448	23,497	23,523	23,526	23,627	4,660
32	0,260	23,923	24,065	24,183	24,279	24,351	24,400	24,426	24,429	24,531	4,650
33	0,270	24,830	24,973	25,092	25,187	25,259	25,308	25,334	25,337	25,439	4,640
34	0,280	25,743	25,885	26,005	26,101	26,173	26,222	26,248	26,250	26,353	4,630
35	0,290	26,660	26,804	26,924	27,020	27,092	27,141	27,166	27,169	27,272	4,620
36	0,300	27,583	27,727	27,847	27,944	28,017	28,065	28,091	28,093	28,196	4,610

Объемы, указанные в градуировочных таблицах для каждого танка приводились к температуре 20 °С. Подобное приведение осуществляется для всех резервуаров [2]. Это необходимо для дальнейших расчетов массы нефтепродуктов, находящихся в танке.

Определение вместимости танков наливного судна позволяет создать градуировочные таблицы танков с учетом крена и дифферента.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 8.903-2015 «ГСИ. Масса нефти и нефтепродуктов. Методики (методы) измерений».
- [2] ГОСТ 8.570-2011 «ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки»

Метрологическое обеспечение измерений массы сжиженного природного газа в танках наливных судов косвенным методом статических измерений

Р. Р. Нурмухаметов
ФГУП «ВНИИР»
г. Казань, Россия
nio-2@vniir.org

Аннотация – В статье приведены нормы точности и метрологические требования к средствам измерений, применяемым при измерениях сжиженного природного газа (СПГ) в танках газозовозов. Рассмотрены особенности метрологические обеспечения косвенного метода статических измерений СПГ.

Ключевые слова – сжиженный природный газ, танкер газозовоз, косвенный метод статических измерений

I. ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие мировая структура рынка СПГ начала меняться. При этом к группе крупнейших производителей СПГ можно отнести и Россию с ее заявленными планами о наращивании производства СПГ до 70-80 млн. т в год [1].

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Следует подчеркнуть, что в соответствии с исследованиями Энергетического центра Сколково спрос на СПГ является результатом сложного взаимодействия целого ряда факторов:

- темпы макроэкономического роста, роста численности населения и динамика энергоемкости экономики – эти факторы определяют суммарную потребность в энергии;
- позиции газа в топливной корзине, которые определяются развитием новых технологий и меняющимся соотношением цен между различными энергоресурсами, а также государственной энергетической и экологической политикой отдельных стран – от этих факторов зависит роль газа среди энергоресурсов;
- конкуренция между сетевым газом и СПГ – этот фактор определяет непосредственно долю СПГ в энергобалансе страны.

Отрасль производства СПГ можно условно разделить на «крупнотоннажный» и «малотоннажный» СПГ.

Первый завод по сжижению газа в России появился в 2009 г. в рамках проекта «Сахалин-2», действующего на условиях Соглашения о разделе продукции.

В 2017 г. запущена первая линия завода по проекту «Ямал СПГ», таким образом, в настоящий момент российские мощности составляют 16,3 млн. тонн.

Для «малотоннажного» производства СПГ в соответствии с ГОСТ Р 55892-2013 [2] устанавливаются граничное значение сверху – 10 т/ч, размер единичной емкости для хранения СПГ (не более 260 м³) и количества СПГ (не более 200 т), при избыточном давлении не более 0,8 МПа.

Существуют два способа продажи СПГ с применением судов: DES (delivery-ex-ship) или FOB (free-on-board). В первом случае продавец берет на себя организацию доставки и расходы. Во втором случае, покупатель забирает СПГ непосредственно на заводе по сжижению и самостоятельно занимается доставкой.

В соответствии с Федеральным законом от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ [3] измерения должны выполняться по аттестованным методикам измерений с применением средств измерений (СИ) утвержденного типа, прошедших поверку.

В первом случае танки газозовозов, уровнемеры, датчики давления и температуры, измерительно-вычислительные комплексы должны быть утвержденного типа.

Во втором случае измерение количества СПГ рекомендуется вести с применением береговых СИ.

Основными влияющими факторами на работу СИ, применяемых для измерений количества СПГ, является низкая температура, которая приводит к значительным изменениям свойств материалов, применяемых в СИ, и нестационарность измеряемой среды, которая приводит к образованию пристеночного кипения, изменению физических свойств среды в зависимости от температуры и давления, образованию паровой фазы.

В Руководстве по отгрузке СПГ потребителям [4] приводятся следующие нормы точности (пределы) для уровнемеров СПГ:

- уровнемеры поплавкового типа – от ± 4 мм до ± 8 мм;
- уровнемеров радарного типа – ± 5 мм;
- лазерных уровнемеров – $\pm 7,5$ мм.

Далее приведены алгоритмы вычисления массы СПГ косвенным методом статических измерений, которые соответствуют ISO 6578 [5].

Массу отгружаемого СПГ вычисляют по формуле:

$$M_{\text{СПГотгр}} = M_{\text{СПГкон}} - M_{\text{СПГнач}}$$

где $M_{\text{кон}}$ - масса СПГ в резервуаре до отгрузки (приемки) СПГ;

$M_{\text{нач}}$ - масса СПГ в резервуаре после отгрузки (приемки) СПГ.

Массу СПГ в резервуаре вычисляют по формуле:

$$M_{\text{СПГ}} = V_{\text{СПГ}} \cdot \rho_{\text{СПГ}} + V_{\text{ог}} \cdot \frac{288,15}{T_{\text{ог}}} \cdot \frac{P_{\text{ог}}}{101,325} \cdot \frac{M_{\text{ог}}}{23,644 \cdot Z_{\text{ог}}},$$

где $V_{\text{СПГ}}$ — объем СПГ, вычисленный с учетом крена и дифферента по градуировочным таблицам на основе результатов измерений уровня стационарными уровнемерами, установленными в танкерах-газовозах, м³;

$\rho_{\text{СПГ}}$ — плотность СПГ, кг/м³, вычисляется по ГОСТ Р 56851-2016;

$V_{\text{ог}}$ — объем отпарного газа, м³;

$T_{\text{ог}}$ — температура отпарного газа, °C;

$P_{\text{ог}}$ — давление отпарного газа, кПа;

$M_{\text{ог}}$ — молярная масса отпарного газа, кг/кмоль, вычисляется по ISO 6578 [5];

$Z_{\text{ог}}$ — фактор сжимаемости, вычисляется по ISO 6578 [5].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Минэнерго России внесло изменение в перечень измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, выполняемых при учете энергетических ресурсов, в котором появились нормы точности измерений массы СПГ.

При разработке методик измерений необходимо учитывать, что, в соответствии с международной практикой, необходимо измерять не только массу СПГ, но и теплотворную способность СПГ. Российские нормативно-правовые акты не требуют измерений теплотворной способности СПГ, однако, этого часто требуют договоры поставки. Поэтому рекомендуется разрабатывать методики измерений с вычислением массы и теплотворной способности СПГ [6].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Отчет Энергетического центра Московской школы управления СКОЛКОВО «Трансформирующийся глобальный рынок СПГ: Как России не упустить окно возможностей?», под редакцией Т. Митрова, А. Собко, С. Злата.
- [2] Отчет Энергетического центра Московской школы управления Сколково «Возможности и перспективы развития малотоннажного СПГ в России», под редакцией А. Климентьев, Т. Митрова, А. Собко.

- [3] Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений" от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ.
- [4] «Руководстве по отгрузке СПГ потребителям. GIIGNL», 2017г. Режим доступа: URL: http://www.giignl.org/system/files/giignl_cthb_5.0.web_.pdf.
- [5] ISO 6578:2017 Refrigerated hydrocarbon liquids - Static measurement – Calculation procedure.
- [6] Соловьев В.Г., Нурмухаметов Р.Р. Особенности метрологического обеспечения сжиженного природного газа при отгрузке в танкеры газовозов //Приборы, 2018г., № 5, с.31-32

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Разработки Сибирского института метрологии по созданию средств измерений параметров нефтепродуктов и перспективы их применения для мониторинга качества

Г. В. Шувалов

ФГУП «Сибирский НИИ метрологии»
г.Новосибирск, Россия
e-mail: shuvalov@sniim.ru

Т. В. Васильева

Лаборатория физико-химических измерений
ФГУП «Сибирский НИИ метрологии»
г.Новосибирск, Россия
e-mail: shuvalov@sniim.ru

Аннотация — Качество нефтепродуктов, в том числе для судовой техники, часто не соответствует требованиям нормативно-технической документации из-за нарушения условий их транспортировки и хранения, что подтверждается результатами многочисленных проверок Росстандарта. Для решения задач мониторинга качества нефтепродуктов в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии разработан комплект измерительных приборов (анализаторов) серии СИМ, который в течение ряда лет успешно эксплуатируется в ряде организаций.

Ключевые слова — средства измерений; параметры нефтепродуктов; контроль качества; комплектная лаборатория анализа нефтепродуктов

I. ВВЕДЕНИЕ

Государственные органы вынуждены принимать меры по недопущению в оборот некачественного или фальсифицированного топлива в связи с тем, что качество нефтепродуктов, поступающих на нефтяной рынок в последнее время, часто не соответствует требованиям нормативно-технической документации из-за нарушения условий их транспортировки и хранения.

При Государственной комиссии по противодействию незаконному обороту промышленной продукции создана межведомственная отраслевая рабочая группа, возглавляемая Руководителем Росстандарта А. В. Абрамовым, по противодействию незаконному обороту продукции нефтяной промышленности.

Эта рабочая группа должна обеспечить:

- создание механизма реализации мер противодействия незаконному обороту некачественных нефтепродуктов;
- подготовку нормативно-правовой базы в области производства и реализации продукции нефтяной промышленности, направленной на обеспечение внутреннего российского рынка качественными и соответствующими установленным требованиям нефтепродуктами;
- выработку скоординированных мер и подходов, которые позволят решить проблему противоправ-

ной деятельности недобросовестных участников нефтяного рынка, включая нелегальные нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ), недобросовестные базы нефтепродуктообеспечения, автозаправочные станции (АЗС) и др.;

- сокращение и исключение из оборота суррогатного топлива;
- предотвращение случаев ввоза на территорию Российской Федерации и дальнейшей реализации топлива несоответствующих экологических классов.

II. Контроль топлив

В 2015-2017 гг. Росстандартом была проведена проверка качества топлив, поставляемых нефтеперерабатывающими и нефтеснабжающими организациями.

Было проверено более 30-ти тысяч автозаправочных станций, более 2-х тысяч нефтебаз, около 240-ка мини-нефтеперерабатывающих заводов и 33 крупных нефтеперерабатывающих завода.

По результатам проверок в таблице 1 представлен уровень нарушений среди АЗС в 2015-2017 гг.

Таблица 1. Нарушения качества топлива среди АЗС

Год	2015	2016	2017 январь-май
Проверено АЗС, шт.	3702	1536	103
Выявлены нарушения на АЗС, шт.	1573 (42,5 %)	274 (18 %)	41 (40 %)
Количество выявленных нарушений по физико-химическим показателям топлива, шт.	717 (20 %)	184 (12 %)	22 (21 %)

Из таблицы 1 видно, что количество выявленных отклонений физико-химических показателей топлива от установленных нормативно-правовыми документами, в

первую очередь техническим регламентом "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту», значительно.

В связи с этим, Росстандартом, для совершенствования нормативной базы, в 2016 г. были разработаны и приняты для применения следующие предварительные национальные стандарты (ПНСТ) Российской Федерации:

- ПНСТ 154-2016 «Нефтепродукты. Восстановление показателей качества»;
- ПНСТ 155-2016 «Нефтепродукты. Применение методов испытаний для подтверждения качества»;
- ПНСТ 156-2016 «Нефтепродукты. Контроль качества при приемке на хранение».

III. ЭКСПРЕСС – АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТОПЛИВ

Особенностью этих стандартов является то, что впервые в практику контроля качества нефтепродуктов вводится понятие экспресс-методов испытаний и условия применения этих методов для подтверждения качества нефтепродуктов.

Так, в ПНСТ 155-2016 экспресс-метод испытаний определен как метод, не регламентированный документом по стандартизации, но позволяющий в короткие сроки провести измерения показателя нефтепродукта с установленным уровнем точности с использованием стационарной и/или мобильной (передвижной) лаборатории.

Также возможно применение экспресс-методов для получения оперативной информации о качестве нефтепродуктов при прямо-сдаточных испытаниях, при этом применение методов должно быть согласовано между поставщиком и потребителем. Кроме того, испытания с использованием экспресс-методов для подтверждения качества нефтепродукта проводят в соответствии с требованиями ПНСТ 155-2016, при этом результаты испытаний экспресс-методами оформляют в виде протокола испытаний.

Результаты испытаний нефтепродуктов, полученные экспресс-методами, можно использовать только для принятия оперативного решения о дальнейшем применении нефтепродукта. В случае выявления некондиционности нефтепродукта, следует провести повторные испытания по проверяемому показателю с применением стандартизованных методов испытаний.

Не допускается использовать экспресс-методы для подтверждения качества продукции, паспортизации и при разногласиях в оценке качества нефтепродукта.

Экспресс-анализаторы, используемые для проведения испытаний, должны обеспечивать необходимую точность измерений определяемого показателя, а также должны быть поверены или метрологически аттестованы.

IV. РАЗРАБОТКИ СИБИРСКОГО ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ В ОБЛАСТИ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА НЕФТЕПРОДУКТОВ

Для решения задач оперативного контроля качества нефтепродуктов в Сибирском научно-исследовательском институте метрологии (ФГУП "СНИИМ") разработан ва-

риант комплектной лаборатории анализа нефтепродуктов «КЛАН-1» [1].

В состав лаборатории входит комплект измерительных приборов (анализаторов), приведенных в таблице 2.

Таблица 2. Перечень приборов для анализа нефтепродуктов

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

Для решения задач экспресс-контроля нефтепродуктов в СНИИМ были разработаны экспресс-анализаторы качества нефтепродуктов для определения механических примесей и содержания воды [2].

Для определения содержания механических примесей в анализаторе СИМ-12 использован оптический метод. Принцип действия прибора основан на регистрации рассеянного оптического излучения инфракрасного диапазона на механических примесях, находящихся в нефтепродукте.

Конструкция анализатора СИМ-12 приведена на рис. 1.

Для определения содержания воды в нефтепродуктах разработан экспресс-анализатор СИМ-4, предназначенный для измерений массовой доли воды в дизельном топливе, моторных и автотракторных маслах при оперативном контроле их качества.

Метод определения массовой доли воды в нефтепродуктах соответствует ГОСТ 14203-69 "Нефть и нефтепродукты. Диэлькометрический метод определения влажности".

Принцип действия экспресс-анализатора основан на емкостном методе измерений относительной диэлектрической проницаемости нефтепродукта.

Диапазон измерений массовой доли воды в нефтепродуктах от 0,01 до 2,00 %, пределы допускаемой относительной погрешности измерений массовой доли воды в нефтепродуктах $\pm 10 \%$.

Масса анализатора составляет не более 1,8 кг, габаритные размеры измерительного прибора - 210x200x65 мм, что позволяет эффективно использовать экспресс-анализатор в проверочных мероприятиях на АЗС.



Рис. 1. Экспресс-анализатор примесей в нефтепродуктах СИМ-12.

Расчет процентного содержания воды в контролируемых нефтепродуктах в зависимости от диэлектрической проницаемости экспресс-анализатор выполняет автоматически и результат измерения индицируется на индикаторе в процентах и граммах на тонну.

Внешний вид анализатора СИМ-4 представлен на рис. 2.



Рис. 2. Экспресс-анализатор содержания воды в нефтепродуктах СИМ-4.

Технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» предъявляет требования к нескольким показателям топлива: содержание серы, температура вспышки, вязкость, фракционный состав и температура застывания.

Один из методов определения содержания серы в топливе изложен в ГОСТ 19121-73, в связи с чем этот метод был положен в основу работы анализатора СИМ-6. В [3] была разработана методика определения серы в нефтепродуктах с использованием кондуктометрического метода, а также реализующий ее прибор СИМ-6.

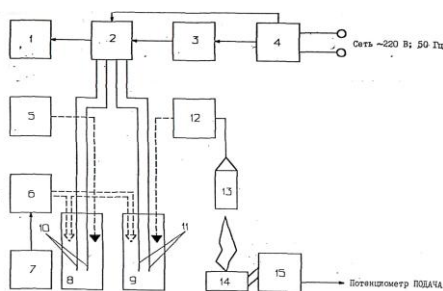


Рис. 3. Структурная схема анализатора СИМ-6.

Структурная схема прибора СИМ-6 включает в себя следующие основные элементы (рис. 3):

- кондуктометрические ячейки 8 и 9 с электродами 10, 11;
- горелка для сжигания топлива 14;
- аспиратор 12 для прокачивания SO₂;
- дозатор 15;
- генератор озона 7 с компрессором 6;
- схема измерения 2 со схемой управления 3;
- блок питания 4.

Следующим из показателей качества топлив является температура вспышки, для определения которой был разработан прибор СИМ-5 [4]. Принцип действия анализатора основан на нагревании контролируемого нефтепродукта электронагревателем, периодическом поджигании паров нефтепродукта и измерение температуры, при которой происходит вспышка.

Функциональная схема анализатора приведена на рис. 4. В состав схемы входят нагревательный блок 1, блок электроники и управления 2.

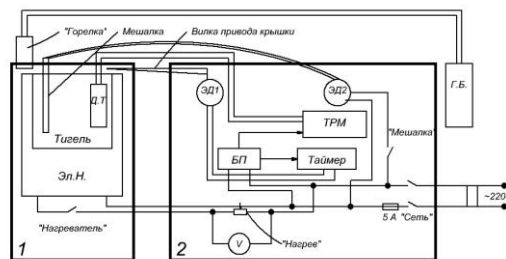


Рис. 4. Схема электрическая функциональная СИМ-5.

Принцип действия анализатора СИМ-8 для определения вязкости основан на измерении времени истечения контролируемого нефтепродукта через капилляр стеклянного вискозиметра с последующим расчетом значения кинематической вязкости.

Функциональная схема анализатора приведена на рис. 5. В термостат, наполненный прозрачной жидкостью (трансформаторное масло или дистиллированная вода), опускается стеклянный вискозиметр ВПЖ-4. Нагрев жидкости в термостате осуществляется с помощью электронагревателя (ЭлН). Для быстрого охлаждения дистиллированной воды в термостате используется лёд.

Для перемешивания нагреваемой жидкости и получения равномерного градиента температур по всему объему термостата используется компрессор (Комп). Воздух через шланг (Шл) поступает непосредственно в зону нагрева.

Регулирование и поддержание температуры термостата осуществляется измерителем-регулятором температуры ТРМ-10 по ПИД-закону. Параметры измерения и регулирования задаются при включении питания энергонезависимой памяти ТРМ-10.

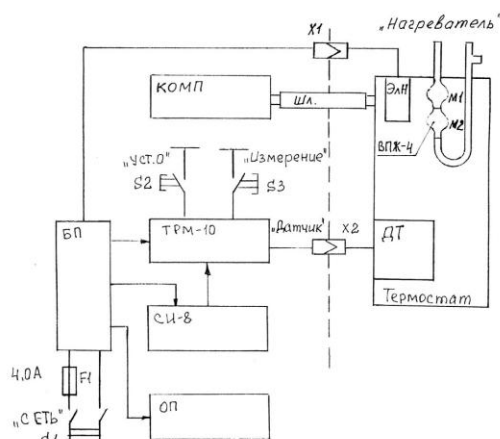


Рис. 5. Функциональная схема анализатора СИМ-8.

Принцип действия анализатора СИМ-11 основан на охлаждении образца контролируемого нефтепродукта хладагентом (жидкий азот) до температуры, при которой образец остается неподвижным. Указанная температура измеряется и принимается за температуру застывания.

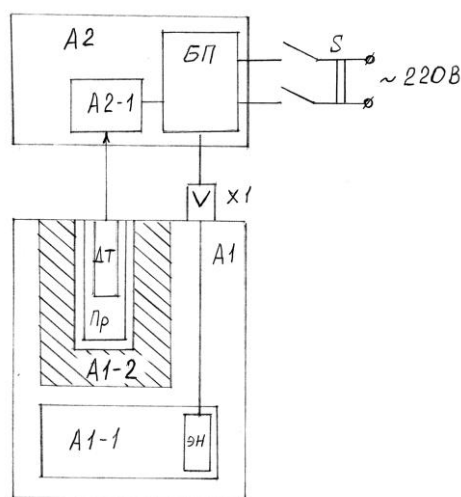
Функциональная схема анализатора приведена на рис. 6.

В сосуд Дюара А1-1 заливают жидкий азот, который через металлическую трубку поступает в теплоизоляционный корпус А1-2. Для регулирования поступления жидкого азота в трубку установлен электронагреватель ЭН, который через кабель (разъем «Х») соединен с блоком питания БП измерительного прибора А2.

Регулятор температуры ТРМ1 предназначен для контроля температуры испытуемого образца.

Блок питания БП вырабатывает необходимые напряжения и включается тумблером S.

На основе разработанных в СНИИМ приборов (анализаторов) для измерений параметров нефтепродуктов (таблица 3) создана передвижная лаборатория «КЛАН-1».



А1 – криостат; А1-1 – сосуд Дюара; А1-2 – теплоизоляционный корпус; ЭН – электронагреватель; ДТ – датчик температуры; Х1 – разъем; А2 – измерительный блок; А2-1 – регулятор температуры ТРМ1; БП – блок питания; S – тумблер включения питания

Рис. 6. Функциональная схема анализатора СИМ-11.

ТАБЛИЦА 3. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ ТИПА «СИМ»

АНАЛИЗАТОР СИМ-5	Предназначен для измерений температуры вспышки нефтепродуктов в полуавтоматическом режиме. Принцип действия основан на измерении температуры, при которой происходит вспышка
АНАЛИЗАТОР СИМ-6	Предназначен для измерений содержания серы в светлых нефтепродуктах, полностью сгорающих в горелке анализатора, и может применяться для оперативного контроля их качества.
АНАЛИЗАТОР СИМ-8	Предназначен для измерений кинематической вязкости нефтепродуктов при нагревании их до 100°C. Метод определения кинематической вязкости соответствует ГОСТ 33-2000.
АНАЛИЗАТОР СИМ-10	Предназначен для разгонки автомобильных бензинов по методике ГОСТ 2177-82 «Нефтепродукты. Метод определения фракционного состава».
АНАЛИЗАТОР СИМ-11	Предназначен для измерений температуры застывания нефтепродуктов. Принцип действия анализатора основан на охлаждении образца нефтепродукта хладагентом (жидкий азот) с заданной скоростью.

В настоящее время лабораториями «КЛАН-1», укомплектованными разработанными приборами (рис. 7), оснащены организации Новосибирской, Кемеровской, Красноярской и Курганской областей, а также стран СНГ (Республики Казахстан и Узбекистан).

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполненные во ФГУП «СНИИМ» разработки новых приборов для определения параметров нефтепродуктов позволили на их основе создавать измерительные комплексы для контроля и мониторинга качества топлива.



Рис. 7. Мобильная лаборатория «КЛАН-1», укомплектованная анализаторами типа СИМ.

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] Шувалов Г.В. Экспресс – анализ некоторых параметров нефтепродуктов при их использовании / Г.В.Шувалов, В.Г. Селятицкий, М.Г. Клековкина,Т.В. Васильева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. - 2015. - №1.- С.114-116.
- [3] 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.
- [4] Шувалов Г.В. Приборы экспресс-анализа диэлектрических жидкостей [Текст]/ В.П. Горелов, А.В. Бондарев, [и др.]// Физика. – 2004. – Т.47. - № 11. – С. 200-202.

Эталонная база в области измерений крутящего момента силы

Б. А. Черепанов

Уральский научно-исследовательский институт метрологии,
г. Екатеринбург, Россия,
e-mail: cherepanov@uniim.ru

Аннотация — В докладе представлены сведения об эталонной базе Российской Федерации и других стран в области измерений крутящего момента силы, об основных характеристиках, сличениях и возможных перспективах развития и совершенствования. Приведена информация о нормативном обеспечении в данной области измерений.

Ключевые слова — государственный первичный эталон; крутящий момент силы; эталон сравнения; дополнительные сличения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Крутящий момент силы (Мкр) – величина, характеризующая многие процессы и определяющая режимы работы машин и агрегатов, применяемых в различных производственных отраслях. Наличие эталонной базы в области измерений Мкр позволяет решать задачи обеспечения единства измерений при разработке и эксплуатации энергетических установок на газоперекачивающих станциях и электростанциях, испытаниях авиационных и судовых двигателей с целью обеспечения достоверности измерений мощности и КПД; испытаний и контроля средств измерений, в том числе зарубежных фирм; метрологического обеспечения нормированной затяжки ответственных резьбовых соединений при производстве и эксплуатации авиационного, железнодорожного и других видов транспорта. Измерения Мкр широко распространены, о чем свидетельствуют значительная номенклатура средств измерений (в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений зарегистрировано около 200 типов средств измерений Мкр: датчиков, измерителей, моментометров, моментных ключей). Об этом также свидетельствует наличие в базе данных МБМВ измерительных и калибровочных возможностей (СМС) национальных метрологических институтов (НМИ) 15 стран: Бразилии, Германии, Египта, Индии, Испании, Китая, Китая (Гонконг), Кореи, Мексики, России, Финляндии, Франции, Чехии, Швейцарии, Японии. Эталонные установки для воспроизведения единицы крутящего момента силы в ранге национальных эталонов имеются и в других странах: Великобритании, Турции, Италии.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Деятельность ФГУП «УНИИМ», в области измерений Мкр была начата в 50-е годы XX века. В эти годы был создан стационарный динамометр кручения [1] с верхним пределом воспроизведения единицы Мкр, равным 20000 Н·м. Для того времени это была одна из лучших по

своим характеристикам установок в мире, воспроизводящих единицу Мкр.

В середине 80-х годов была создана эталонная установка с диапазоном воспроизведения единицы от 20 до 2500 Н·м, которая получила статус Государственного первичного эталона единицы крутящего момента силы с присвоением номера ГЭТ 149-85.

В период 2006-2009 гг. были выполнены работы по совершенствованию ГЭТ 149-85, направленные на существенное расширение диапазона воспроизведения единицы на основе разработки и включения в состав эталона ещё двух эталонных установок, с применением современных технических решений и комплектующих, особенно при разработке систем управления установками. В 2009 г. работы по совершенствованию эталона были завершены и эталон утвержден приказом Росстандарта от 12.05.2010 г. № 1717 [2] с присвоением номера ГЭТ 149-2010.

ГЭТ 149-2010 состоит из трех стационарных эталонных установок:

- ЭУ-250 с диапазоном воспроизведения единицы Мкр от 1 до 250 Н·м;
- ЭУ-2500 с диапазоном воспроизведения от 20 до 2500 Н·м;
- ЭУ-20000 с диапазоном воспроизведения от 200 до 20000 Н·м.

Все эталонные установки, входящие в состав ГЭТ 149-2010, являются рычажными установками так называемого deadweight-типа, в которых усилие создается за счёт массы грузов, находящихся в гравитационном поле земли. Эталонные установки включают в себя наборы мер силы и рычаги с опорными и грузоприемными призмами. Установки снабжены механизмами нагружения поверяемых средств измерений крутящим моментом, а также другими устройствами, обеспечивающими реализацию основных функций эталона: воспроизведение, хранение и передачу единицы Мкр. В состав эталона включены компараторы (эталонные датчики ТВ2 с верхними пределами измерений 500, 3000 и 10000 Н·м), предназначенные для передачи единицы, а также для использования их в качестве эталонов сравнения при проведении сличений эталона.

Расширенная относительная неопределенность воспроизведения единицы Мкр эталона ГЭТ 149-2010, во всем диапазоне воспроизведения единицы от 1 до 20000 Н·м, не превышает значения $5,0 \cdot 10^{-4}$ (0,05 %).

В период с 2012 по 2016 годы были проведены дополнительные сличения ГЭТ 149-2010 с эталоном РТВ, Германия по теме КООМЕТ 512/RU-a/10.

Заявленные и подтвержденные проведенными сличениями калибровочные и измерительные возможности Российской Федерации в области крутящего момента силы были одобрены и опубликованы в ноябре 2017 года в базе данных МБМВ.

В табл. 1 приведены СМС России, реализованные в ГЭТ 149-2010, и СМС некоторых зарубежных НМИ.

Таблица 1. Калибровочные и измерительные возможности России и некоторых зарубежных НМИ

НМИ (Страна)	Диапазон воспроизведения единицы, Н·м	Относительная расширенная неопределенность
УНИИМ (Россия)	1 – 20000 100 – 2500*	$5,0 \cdot 10^{-4}$ $2,0 \cdot 10^{-4}$ *
РТВ (Германия)	0,01 – 20000	$2,0 \cdot 10^{-4}$ – $2,0 \cdot 10^{-5}$
NPLI (Индия)	2 – 2000	$1,0 \cdot 10^{-4}$
NIM (Китай)	0,5 – 5000	$1,0 \cdot 10^{-4}$
СМІ (Чехия)	10 – 1000	$5,0 \cdot 10^{-4}$
NMIJ (Япония)	5 – 20000	$5,0 \cdot 10^{-5}$ – $7,0 \cdot 10^{-5}$
* – подтвержденные сличениями COOMET.M.T-S1		

Основными нормативными документами, разработанными ФГУП «УНИИМ», регулирующими метрологическое обеспечение измерений Мкр, являются:

- ГОСТ Р 8.752-2011 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений крутящего момента силы»;
- ГОСТ Р 8.796-2012 «ГСИ. Измерители крутящего момента силы. Методика поверки»;
- ГОСТ 33530-2015 «Инструмент монтажный для нормированной затяжки резьбовых соединений. Ключи моментные. Общие технические условия», (межгосударственный, ISO 6789:2003 MOD).

Государственная поверочная схема для средств измерений Мкр предусматривает наличие при передаче единицы рабочим средствам измерений двух полей эталонов, эталонов первого и второго разряда.

Эталон первого разряда представлены как рычажными установками deadweight-типа, так и установками reference-типа, в которых единица воспроизводится с помощью измерителя Мкр, который получает её от эталона deadweight-типа как более точного.

Эталон второго разряда представлены, в основном, высокоточными измерителями Мкр, использующимися для поверки (калибровки) моментных (динамометрических) ключей, применяемых для затяжки резьбовых соединений с нормированным значением крутящего момента силы. Эталон второго разряда используют Государственные региональные центры метрологии (ГРЦМ) и аккредитованные организации, а также промышленные предприятия, для целей обеспечения качества продукции и услуг.

Кроме того поверочная схема предусматривает использование средств измерений, заимствованных из других поверочных схем для воспроизведения и передачи единицы Мкр за пределами диапазона воспроизведения, обеспечиваемого ГЭТ 149-2010.

За рубежом наиболее мощной эталонной базой обладает НМИ Германии – РТВ. Эталонная база РТВ включает в свой состав семь эталонных установок с общим диапазоном воспроизведения от 1,0 мН·м до 1,1 МН·м [3]. Три из этих установок deadweight-типа, три установки reference-типа и одна уникальная установка с верхним пределом воспроизведения, равным 1,1 МН·м, – рычажная с использованием динамометров. Данная установка в настоящее время обладает самым большим верхним пределом воспроизведения единицы в мире. В связи с развитием ветроэнергетики в странах Европы, Европейской региональной метрологической организацией (EURAMET) в сентябре 2015 года, в рамках Европейской программы по метрологии для инноваций и исследований (EMPIR), были начаты работы по проекту под названием «Крутящий момент в диапазоне MN·m» [4], предполагающий разработку эталонной установки с верхним пределом до 20 МН·м.

За рубежом нормативные документы, в основном, представлены методиками калибровки средств измерений Мкр, например, EURAMET EA-10/14, DIN 51309:2005 в Германии, BS 7882 в Великобритании, документы организации ASTM, E2428-08, E2428 - 15a, E2624-17 в США.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГЭТ 149-2010 и возглавляемая им государственная поверочная схема обеспечивают точность воспроизведения и передачи единицы Мкр средствам измерений, необходимую отечественной промышленности в настоящее время. Вместе с тем, в последнее время отдельные предприятия и организации заявляют о необходимости расширения диапазона воспроизведения единицы Мкр в область величин менее 1,0 Н·м и более 20,0 кН·м.

По оценкам специалистов ФГУП «УНИИМ», необходимо обеспечить диапазоны воспроизведения в области малых значений Мкр от 0,01 до 1,0 Н·м и в области больших значений от 20,0 до 200 кН·м.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Токарь Н.Г., Вандышев Б.А., Савицкий Ф.С., Ивановский О.В. Установка для воспроизведения крутящего момента до 20000 Н·м //Труды метрологических институтов. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева. М.: Изд-во стандартов, 1974, вып. 156 (216). С. 67-75.
- [2] Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 мая 2010 г. № 1717 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы крутящего момента силы». http://old.gost.ru/wps/portal/ord?number=custom_1473845041349_1053 (Электронный ресурс).
- [3] Сайт РТВ, URL: <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-12/ag-122.html> (Электронный ресурс).
- [4] Torque measurement in the MN·m range, URL: https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtcp_project_show%5Bproject%5D=1326 (Электронный ресурс).

Дистанционное управление измерениями на государственном рабочем эталоне 1 разряда единицы длины

Е. Б. Брюховецкая, Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалев

отдел геометрических измерений
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»
г. Санкт-Петербург, Россия
info@vniim.ru

Аннотация — В работе кратко обоснована необходимость повышения точности измерений мер внутреннего диаметра – эталонных измерительных колец. Представлено описание Государственного рабочего эталона единицы длины 1 разряда, введенного в эксплуатацию во ФГУП «ВНИИМ». Показаны возможности применения эталона в области измерений внутренних размеров, исходя из его технических характеристик и конструктивных особенностей. Описаны перспективы внедрения дистанционного управления измерениями на эталоне, а также приведены соответствующие результаты теоретических исследований неопределенности измерений внутренних диаметров. Сформулированы перспективные направления дальнейшей работы по повышению уровня метрологического обеспечения измерений эталонных мер внутреннего диаметра.

Ключевые слова — меры диаметра, измерительные кольца, неопределенность измерений, автоматизация измерений

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоточные измерения внутренних размеров – одна из актуальных задач современной метрологии. Во всех отраслях науки и промышленности встречаются узлы и механизмы, для обеспечения точной сборки и надежного функционирования которых необходимы измерения внутренних геометрических размеров элементов различной формы. Рост и развитие промышленности, в частности, судостроения, авиационной, нефте- и газодобывающей отраслей, естественным образом ведут к повышению требований к точности изготовления и контроля изделий, в том числе в части внутренних размеров.

Метрологическое обеспечение измерений внутренних размеров, включающее в себя регламент передачи единицы длины в данной области, отражено в актуальной редакции Государственной поверочной схемы для средств измерений длины [1]. В качестве мер, обеспечивающих хранение и воспроизведение единицы длины, здесь используются эталонные меры диаметра – измерительные кольца. В зависимости от разряда, кольца могут передавать единицу как высокоточным средствам измерений (в частности, горизонтальным длиномерам низших разрядов), так и рабочим средствам, используемым для определения внутренних размеров (нутромеры). Стоит обратить внимание, что в действующую поверочную схему впервые введены измерительные кольца 1 разряда, получающие

единицу длины от вторичных эталонов, принцип действия которых основан на лазерной интерферометрии [2]. Ранее наивысшим разрядом для такого типа мер был установлен второй. Повышение разряда, а следовательно, и точности измерений мер диаметра, напрямую связано с повышением требований к точности измерений внутренних размеров со стороны науки и промышленности. Об актуальности работ по повышению уровня метрологического обеспечения измерений внутренних диаметров говорит и статистика ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». В качестве иллюстрации на рис. 1 приведен график, отражающий процент калибровок эталонных измерительных колец от общего объема калибровочных работ, выполненных лабораторией отдела геометрических измерений за последние четыре года.

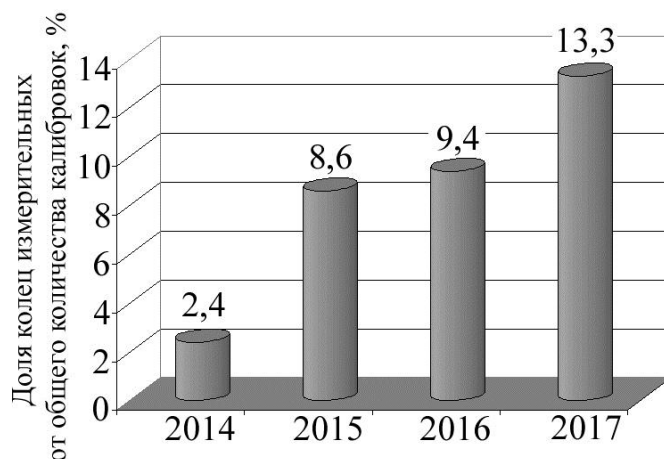


Рис. 1. Доля колец измерительных в объеме калибровочных работ лаборатории метрологического обеспечения специализированных средств измерений геометрических величин, параметров резьбы и средств измерений неразрушающего контроля ВНИИМ за период 2014 – 2017 гг.

В 2014 г. во ВНИИМ введен в эксплуатацию Государственный рабочий эталон единицы длины 1 разряда в диапазоне (10^{-6} – 1100) мм. Одна из основных областей применения эталона – измерения внутренних размеров, а его метрологические характеристики позволяют успешно использовать эталон при передаче единицы длины эталонным измерительным кольцам. Особенности конструкции

эталона, а также условий его эксплуатации и содержания приведены ниже.

II. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАБОЧИЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ 1 РАЗРЯДА

Государственный эталон, являющийся предметом исследования, представляет собой высокоточный измерительный комплекс на базе горизонтального длиномера. Общий вид комплекса приведен на рисунке 2.

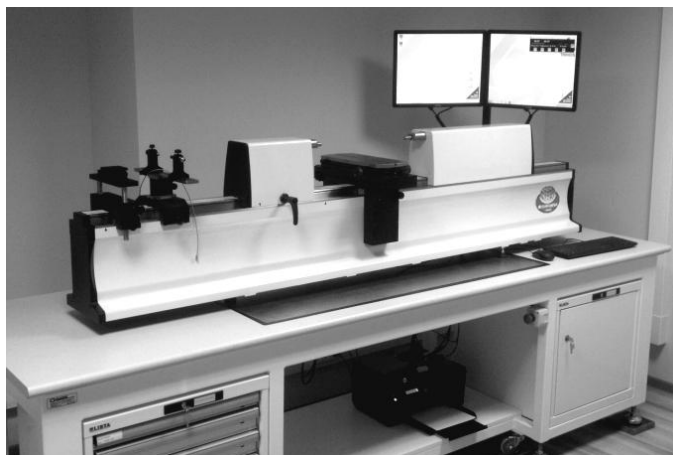


Рис. 2. Общий вид Государственного рабочего эталона единицы длины 1 разряда

Основная область применения эталона: измерения плоскопараллельных концевых мер длины, мер наружного и внутреннего диаметров, калибров резьбовых цилиндрических, а также геометрических параметров мер толщины покрытий [3]. Метрологические характеристики комплекса, соответствующие эталону 1 разряда согласно Государственной поверочной схеме для средств измерений длины, подтверждены результатами продолжительных исследований комплекса с использованием эталонных плоскопараллельных концевых мер длины, а также измерителя перемещений лазерного из состава ГЭТ 2-2010 [4]. Такой результат достигнут благодаря ряду технических решений, реализованных на различных этапах проектирования и внедрения комплекса, а также за счет конструктивных особенностей использованного при его создании горизонтального длиномера.

Среди таких технических решений следующие.

Длинномер из состава комплекса размещен на специально спроектированном виброзащитном столе со встроенной пневматической системой с обратной связью, позволяющей автоматически регулировать горизонтальное положение длиномера и компенсирующей изменение центра тяжести при перемещении подвижных кареток и измерительного стола.

Комплекс оснащен измерительным столом повышенной грузоподъемности, для работы с объектами, в том числе, измерительными кольцами, масса которых достигает порядка десяти килограмм при номинальных диаметрах более 200 мм.

Перемещение измерительной каретки осуществляется только в автоматическом режиме, что исключает ошибки, связанные со сбоем счета.

Измерительный стол длиномера снабжен приводами, управляющими горизонтальным и вертикальным перемещением, что позволяет точно позиционировать меру диаметра относительно измерительной оси.

Длинномер оснащен системой автоматического задания и приложения измерительного усилия, что особенно важно при измерении мер внутреннего диаметра, когда измерительное усилие прикладывается дважды с противоположных сторон образующей, и характер приложения должен оставаться неизменным.

Комплекс снабжен системой температурной компенсации, вносящей поправки в результаты измерений в режиме реального времени, что позволяет минимизировать влияние температуры на результат измерений.

Кроме того, применены меры по термостатированию помещения, в котором расположен комплекс.

Оснащение измерительной каретки и измерительного стола длиномера моторизованными приводами позволяет выполнять измерения внутреннего диаметра эталонных колец полностью в автоматическом режиме, с помощью функций программного обеспечения, под управлением которого работает длиномер.



Рис. 3. Измерение внутреннего диаметра кольца на эталоне ВНИИМ с использованием патрона для установки контактного щупа со сферическим наконечником

При этом измерительная система, обрабатывая совместно показания отсчетного устройства длиномера и данные о величине приложенного к сферическому наконечнику усилия, самостоятельно выполняет поиск точек контакта сферического наконечника с образующей кольца, соответствующих наибольшей измеряемой длине, то есть, искомому внутреннему диаметру эталонного кольца (рис. 3).

III. ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ МЕР ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА

Один из влияющих факторов, вносящих наибольший вклад в неопределенность измерений геометрических величин – температура измеряемого объекта. Таким образом, очевидным путем минимизации неопределенности измерений мер внутреннего диаметра с использованием исследуемого комплекса является повышение уровня ста-

бильности температуры окружающей среды в измерительной лаборатории.

Для реализации данного методического решения предлагается интегрировать в комплекс систему дистанционного управления измерениями. Поскольку весь процесс измерений внутреннего диаметра эталонного кольца может быть автоматизирован, представляется возможным дополнительно снизить влияние оператора на процесс измерений, разместив рабочее место поверителя в помещении, смежном с лабораторией, в которой размещен комплекс.

На практике это планируется реализовать следующим образом.

Во-первых, устройства ввода-вывода (клавиатура, мышь, мониторы) управляющего компьютера длиномера из состава комплекса будут продублированы. Также комплекс будет оснащен дополнительным набором из двух мониторов, для обеспечения функций управления измерениями в полном объеме. Для этих целей предлагается использовать серийно выпускаемый разветвитель VGA сигнала GVS-124 (фирма «Gembird Europe BV», Нидерланды). Аналогичное устройство в настоящее время успешно используется в схожих целях на ГЭТ 2-2010.

Во-вторых, для осуществления визуального контроля процесса измерений, комплекс будет снабжен портативными цифровыми камерами с выводом сигнала на рабочее место поверителя в режиме реального времени. Предполагается использование как минимум трех камер: двух для наблюдения за контактом сферического наконечника измерительной каретки длиномера с образующей рабочей поверхности эталонного кольца с двух противоположных сторон, и одной камеры общего вида для контроля за процессом измерений в целом, то есть, наблюдение за ходом измерений во избежание возможного повреждения измерительных приспособлений и самого комплекса в случае возникновения аварийных ситуаций.

В результате внедрения описанной выше организации рабочего пространства эталонного комплекса мы получим два полноценных рабочих места, на каждом из которых функциональные возможности горизонтального длиномера будут доступны в полном объеме.

Структурная схема, поясняющая расположение отдельных блоков комплекса после проведения предлагаемой оптимизации, изображена на рис. 4.

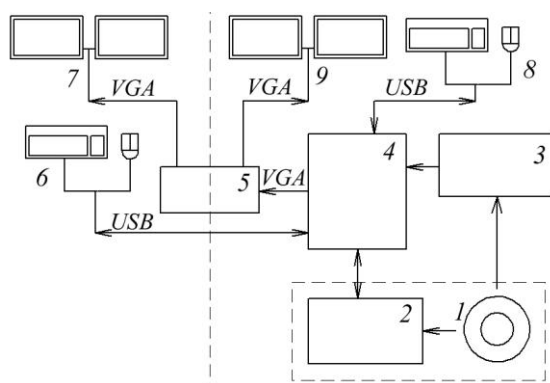


Рис. 4. Структурная схема эталонного измерительного комплекса.

1 – измеряемое кольцо; 2 – отсчетное устройство длиномера; 3 – система захвата видеоизображения; 4 – управляющий компьютер измерительного

комплекса; 5 – разветвитель VGA сигнала; 6 – дублирующие устройства ввода-вывода; 7 – дублирующие мониторы; 8 – устройства ввода-вывода управляющего компьютера; 9 – мониторы управляющего компьютера.

Для захвата видеоизображения предполагается использование портативных беспроводных цифровых камер фирмы «JMK CCTV» (Ирландия). Параметры массы и габаритов таких камер позволяют осуществить их монтаж на измерительном столе с применением крепежных приспособлений, входящих в комплект длиномера. Окончательный выбор конкретной модели будет сделан по результатам анализа уровня видеосигнала и качества получаемого изображения.

IV. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Внедрение системы дистанционного управления измерениями на эталонном комплексе позволит снизить влияние температурного фактора следующим образом.

Во-первых, будут исключены колебания температурного поля в измерительном объеме горизонтального длиномера, связанные с присутствием оператора (поверителя).

Во-вторых, применение портативных видеокамер для контроля за процессом измерений позволит отказаться от общего освещения лаборатории в пользу точечной подсветки отдельных элементов измеряемого объекта (эталонного кольца) маломощными светодиодами. Это в свою очередь также позволит добиться более высокой стабильности температуры окружающей среды во времени.

Предполагаемый эффект от внедрения системы дистанционного управления можно оценить по результатам наблюдений за динамикой изменения температуры измеряемого на эталонном комплексе объекта, которые представлены на рис. 5 в виде графика.

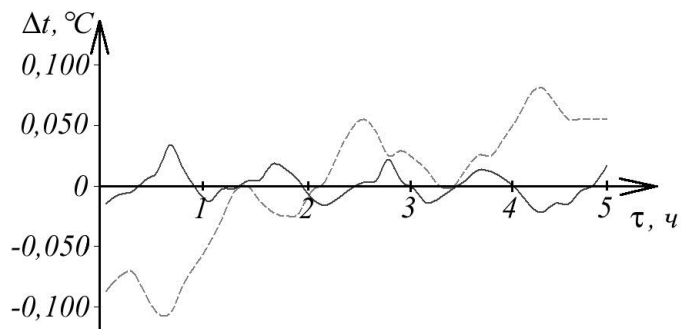


Рис. 5. График изменения температуры измеряемого объекта с течением времени.

На данном графике пунктирной линией показаны колебания температуры в процессе непосредственной работы поверителя по проведению измерений на длиномере из состава эталонного комплекса. Сплошная линия соответствует аналогичным колебаниям температуры при отсутствии дополнительных источников тепла. Время наблюдений – 5 ч. Изменение температуры представлено относительно средних значений, которые для обоих случаев приведены к одной точке для достижения наглядности.

Как видно из графика, характерный разброс значений температуры при отсутствии внешних источников тепла (то есть, при внедрении системы дистанционного управления измерениями) снижается в два раза и находится в

пределах $0,08^{\circ}\text{C}$. При измерении внутреннего диаметра эталонных колец из твердого сплава с неопределенностью температурного коэффициента линейного расширения порядка $0,5 \times 10^{-6} \times \text{K}^{-1}$ [5] это даст вклад в неопределенность измерений диаметра через соответствующую составляющую $0,04 \times D \times 10^{-3}$ мкм (D – измеряемый диаметр в мм). Таким образом, данная составляющая неопределенности будет снижена на 20 %.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 8.763-2011. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм. Введ. 13.12.2011. М.: Стандартинформ. – 2013. – 8 с.
- [2] Mosckalev A., Rahman A. Research and Improvement of Laser Interferometric System in the Field of Non-contact Measurements of Reference Rings // *Technics, technologies, engineering*. – 2018. – № 3. – pp. 18-22.
- [3] E. Bryukhovetskaya. Current problems of metrological assurance in the field of measurements of coating thickness // 27th International scientific symposium «Metrology and metrology assurance 2017». Proc. – Sozopol. – 2017. – pp. 70-72.
- [4] Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А. Измерения геометрических параметров резьбовых калибров // *Измерительная техника*. – 2016. – № 2. – С. 24 – 27.
- [5] Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука. – 1974. – 294 с.

Модернизированная установка для измерений и воспроизведения амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред в системе передачи размеров воспроизводимых единиц рабочим средствам измерений

В. Г. Бакшеев, В. И. Панин, А. В. Шулатов, В. В. Хомяков
Дальневосточный филиал ФГУП «ВНИИФТРИ»,
г. Хабаровск, Россия

Аннотация — Представлена информация о модернизированной установке для измерений и воспроизведения амплитуды ультразвукового (УЗ) смещения и колебательной скорости поверхности твёрдых сред в системе передачи размеров воспроизводимых единиц нижестоящим средствам измерений.

Ключевые слова — ультразвуковое смещение, колебательная скорость, национальный эталон

I. ВВЕДЕНИЕ

Национальный эталон ГЭТ 194-2011 возглавляет поверочную схему для средств измерений амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред в диапазоне частот от 0,02 до 30 МГц. В его состав входит исходная эталонная установка. В [1] дано её краткое описание. Исходная эталонная установка не может непосредственно осуществить передачу воспроизводимых эталоном единиц в столь широкой области частот при различных типах волнового движения в твердых телах. Она ограничена частотным диапазоном (0,3—3,0) МГц. Поэтому была разработана и изготовлена установка, обеспечивающая передачу размеров единиц УЗ смещения и колебательной скорости поверхности твёрдых сред от ГЭТ 194-2011 нижестоящими СИ в диапазоне частот (0,02—10,0) МГц.

II. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

К указанным выше СИ относятся как рабочие, так и эталонные средства, воспроизводящие различные типы волн в различных средах и телах, в виде мер ультразвукового смещения (МСУС), преобразователей-формирователей акустического поля на различные типы волн.

С помощью этих эталонных средств осуществляется калибровка и поверка рабочих приборов и ультразвуковых преобразователей. Упрощенная схема передачи размеров воспроизводимых единиц ультразвукового смещения и

колебательной скорости рабочим средством приведена на рис. 1.

Кроме указанной на схеме функции передачи размеров единиц, с помощью модернизированной установки реализована возможность непосредственного измерения параметров УЗ колебаний, например, в зоне касания рук оператора с преобразователями для проверки допустимого уровня «контактного ультразвука» на предмет его соответствия существующим нормам безопасности.

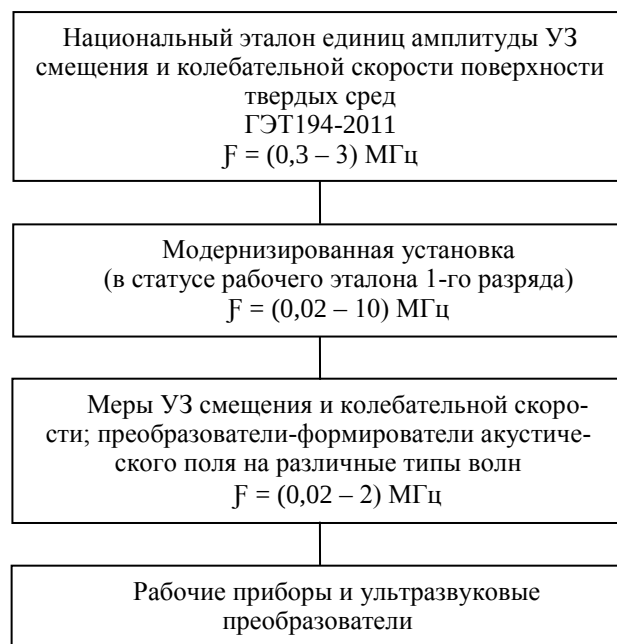


Рис. 1. Упрощенная схема передачи размеров воспроизводимых единиц ультразвукового смещения и колебательной скорости рабочим средствам.

Таким образом, имеется возможность:

- обеспечить калибровку и поверку средств акустической эмиссии;

- обеспечить измерение уровней ультразвука;
- технического обеспечения разработки методик контроля, связывающих параметры состояния, показатели качества (течь и её величина, развивающиеся дефекты, их размеры и др.) с параметрами ультразвуковых колебаний (смещение, колебательная скорость, мощность и др.);
- проводить метрологические исследования ультразвуковых преобразователей и аппаратуры при их разработке и др.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторы обладают необходимым опытом и имеют возможность осуществлять разработки эталонных средств в расширенном диапазоне частот и типов волновых воздействий для калибровки рабочих средств, в том числе, в специфических условиях Заказчика.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бакшеев В.Г., Панин В.И., Троценко В.П., Шулатов А.В., Хомяков В.В. Эталонная установка для измерения амплитуды ультразвукового смещения и колебательной скорости поверхности твердых сред // Четвёртая всероссийская научно-техническая конференция. Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях Судометрика–2012. Тезисы докладов. СПб, 2012. С. 161-162.

Цифровые запоминающие осциллографы высокого разрешения

А. А. Дедюхин
АО «ПриСТ»
г. Москва, Россия

С. С. Чистякова
Обособленное подразделение в г. Санкт-Петербург
АО «ПриСТ»
г. Санкт-Петербург, Россия
spb@prist.ru

Аннотация – Представлены возможные подходы к проектированию цифровых запоминающих осциллографов высокого разрешения, особенности и результаты применения одного из подходов.

Ключевые слова – Цифровой запоминающий осциллограф, высокая четкость, высокое разрешение, режим высокого разрешения, цифровой сигнальный процессор, программируемая логическая интегральная схема (digital oscilloscope, high definition, high resolution, High Res mode, digital signal processor, field-programmable gate array)

I. ВВЕДЕНИЕ

Относительно невысокая стоимость и доступность компонентов [1,2] сделали цифровые запоминающие осциллографы (ЦЗО) на основе 8-битных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) наиболее распространенными. За последние годы появилось множество новых осциллографов с более чем 8-битной разрешающей способностью. Термины «высокая четкость» («High-Definition») и «высокое разрешение» («high resolution») стали широко использоваться производителями для описания преимуществ ЦЗО в случае улучшения одного или более параметров обычного 8-битного осциллографа [3]. Производители многих осциллографов, у которых заявлены «высокая четкость», «высокое разрешение» или «режим высокого разрешения» (High Res mode) жертвуют некоторой комбинацией из полосы пропускания, частоты дискретизации, количества каналов для достижения более высокого разрешения [4,5]. Рекламируемое преимущество «высокого разрешения» некоторых производителей в реальности не привело к снижению уровня собственного шума осциллографа. Важно понимать, как реальная производительность осциллографа «высокого разрешения» влияет на результаты тестирования встроенных вычислительных систем, преобразователей мощности и решения задач электромагнитной совместимости (ЭМС).

II. ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРЫ ЦЗО ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Цифровые осциллографы предназначены для исследования формы, измерений амплитудных и временных параметров электрических сигналов. Они преобразуют аналоговые сигналы в цифровые отсчеты с заявленной точностью. Осциллографы с большим разрешением имеют большую точность, если не было допущено ошибок при проектировании и производстве осциллографа. На практике вертикальная точность характеризуется погрешностью измерений напряжения постоянного тока, проводи-

мой (у некоторых производителей) на полной шкале с нулевым смещением.

Стоит отметить, что само по себе «высокое разрешение» (увеличение разрядности АЦП) не приводит к созданию более точной системы. Надлежащим образом разработанные малошумящие компоненты с низким джиттером – ключ к увеличению точности и разрешающей способности.

Ожидаемое пользователем свойство ЦЗО – достоверность наблюдаемого сигнала с минимальными задержками на обработку и отображение. Одной из составляющих задержки, предшествующей отображению является компенсация эффектов, вызванных влиянием нелинейности частотной характеристики системы сбора сигнала [5]. В ЦЗО компенсация производится программными методами на цифровом сигнальном процессоре [6], что делает процесс компенсации медленным, но в целом приемлемым.

Как описано в [7], высокое разрешение достигается за счет аппаратных средств, программной пост-обработки или комбинации их обоих. Существует два правила в различных подходах к проектированию [8]:

1. Аппаратная реализация высокого разрешения обеспечивает лучшие шумовые отношения и большее значение эффективного числа бит если равносильные программные технологии используются в пост-обработке.
2. Программные методы пост-обработки не могут заменить аппаратную реализацию высокого разрешения при сохранении пропускной способности и частоты дискретизации.

III. ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЦЗО ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Ниже приведены возможные подходы к проектированию осциллографов с высоким разрешением [8].

1) Подход 1.

а) Система сбора сигнала как у 8-битного осциллографа.

б) Компоненты высокого разрешения отсутствуют.

в) Используются специализированные программные режимы пост-обработки. Происходит уменьшение полосы пропускания и частоты дискретизации при высоком разрешении.

2) Подход 2.

а) Система сбора сигнала как у 8-битного осциллографа.

б) Присутствует компонент высокого разрешения (обычно АЦП, объявленный как 10-ти или 12-разрядный).

3) Подход 3.

а) Низкошумящий входной каскад.

б) АЦП высокого разрешения (обычно 12 бит)

с) Архитектура с низким уровнем шума

4) Подход 4.

а) Комбинация 1 и 3 подходов.

б) Комбинация 1 и 2 подходов.

Перечисленные подходы применимы и дают результат. Достижение заявляемого разрешения при программной пост-обработке приводит к сокращению полосы пропускания и уменьшению частоты дискретизации осциллографа без значительного улучшения погрешности измерения напряжения на постоянном токе. Если эти компромиссы известны и приемлемы для пользователей осциллографов, то так же приемлемой любой из перечисленных подходов к разработке осциллографов.

IV. НОВАЯ АРХИТЕКТУРА ЦЗО

Основываясь на Подходе 3, компания Teledyne LeCroy предложила устройство с полосой пропускания до 8 ГГц.

Изменения коснулись аналогово-цифровых преобразователей - они стали 12-ти битными. Также изменены усилители системы сбора и захвата сигнала, обеспечивающие высокое отношение сигнал/шум в полосе до 8 ГГц. В 2016 году компания Teledyne LeCroy начала производство осциллографов с 12 битным АЦП и улучшенными характеристиками системы сбора и захвата сигнала, однако максимальная полоса пропускания в серии осциллографов не превышала 1 ГГц. Описанные изменения в три раза уменьшили погрешность измерений напряжения постоянного тока (до $\pm 0,5\%$) относительно аналогичной версии 8-битного разрешения и стали основой аппаратной реализации нового чипсета разработки Teledyne LeCroy.

Новая архитектура системы сбора и захвата сигнала построена с использованием программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), что позволяет не только существенно увеличить скорость компенсации влияния частотной характеристики, но и увеличить объем памяти, используемой для наблюдаемого сигнала, до недостижимых ранее объемов в 5 Гвыб. Стало возможным обеспечить наблюдение сигнала с длительностью до 250 мс при частоте дискретизации 20 Гвыб/с.

V. РЕАЛИЗАЦИЯ НОВОЙ АРХИТЕКТУРЫ ЦЗО

Серия осциллографов Wave Pro HD от Teledyne LeCroy построена на описанной выше архитектуре и обладает уникальными для отрасли характеристиками: погрешность измерения напряжения постоянного тока в пределах $\pm 0,5\%$ от полной шкалы при полосе пропускания до 8 ГГц, 12-ти битный АЦП и частота дискретизации до 20 Гвыб/с, память до 5 Гвыб. Совокупность указанных улучшений стала продолжением развития технологии HDO4096 [7,9,10].

В серии реализована новая интерфейсная входная шина ProBus 2, совместимая с BNC пробниками и имеющая полосу пропускания 8 ГГц, что позволяет сопрягать без адаптеров уже имеющиеся пробники с интерфейсом ProBus. В Wave Pro HD аналоговые входы с высоким разрешением могут дополняться цифровыми (MSO) для захвата сигнала аналоговых датчиков, цифровой логики, последовательных данных, шин питания и т.д.

Серия Wave Pro HD позволяет оперативно и своевременно отображать как сам захваченный сигнал, так и результаты его обработки пакетами программных опций и стандартных инструментов в числе которых инструменты для анализа сигналов и выявления проблем при исследовании параметров электропитания, анализе импульсов, определения помех в задачах ЭМС, синхронизации и декодировании сигналов последовательной передачи (в том числе и джиттера сигнала), проведения тестов на соответствие различным протоколам.

VI. ВЫВОДЫ

Термины «высокая чёткость» и «высокое разрешение» широко используются производителями для описания преимуществ ЦЗО. Важно понимать как реальная производительность осциллографа «высокого разрешения» / «высокой чёткости» влияет на результаты тестирования. Возможны различные подходы к проектированию осциллографов с высоким разрешением. Достижение заявляемого «высокого разрешения» / «высокой чёткости» при программной пост-обработке приводит к сокращению полосы пропускания и уменьшению частоты дискретизации осциллографа без значительного улучшения погрешности измерения напряжения на постоянном токе. Если эти компромиссы известны и приемлемы для пользователей осциллографов, то так же приемлемой любой из перечисленных подходов к разработке осциллографов.

Существуют правила в различных подходах к проектированию: аппаратная реализация высокого разрешения обеспечивает лучшие шумовые отношения и большее значение эффективного числа бит если равносильные программные технологии используются в пост-обработке; программные методы пост-обработки не могут заменить аппаратную реализацию высокого разрешения при сохранении пропускной способности и частоты дискретизации.

На практике вертикальная точность характеризуется погрешностью измерения напряжения постоянного тока.

Реализация системного подхода позволяет обеспечить погрешность измерений напряжения постоянного тока в пределах не более $\pm 0,5\%$ при использовании 12-битного АЦП.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности архитектуры цифрового запоминающего осциллографа высокого разрешения, приведены возможные подходы к его проектированию и результаты внедрения одного из подходов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стандартные АЦП. Электронный ресурс: <http://www.analog.com/ru/products/analog-to-digital-converters/standard-adc.html>.

- [2] Analog-to-Digital Converters (ADCs) Электронный ресурс: <http://www.ti.com/data-converters/adc-circuit/overview.html>.
- [3] R&S@RTO Digital Oscilloscope Specifications Электронный ресурс: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/RTO2000_dat-sw_en_3607-2684-22_v1601.pdf.
- [4] Infiniium S-Series High-Definition Oscilloscopes Data sheet, Электронный ресурс: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5991-3904EN.pdf?id=2447379>.
- [5] В.А. Тюрин Цифровой запоминающий осциллограф. Устройство и принцип действия: учебно-методическое пособие / В.А. Тюрин. - Казань: Казанский федеральный университет, 2016. - 101 с.
- [6] Digital frequency response publication classification compensator and arbitrary response generator system [Текст]. Патент US 2003/0161420 A1, МПК H04L 25/08 / Peter J. Pupalaikis, заявл. 27.02.2002, опублик. 28.08.2003.
- [7] С.С. Чистякова, Технологии повышения разрешающей способности цифровых запоминающих осциллографов / Материалы шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» («Судометрика 2016»)/ред. Грановский – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2016 – 73-75 с.
- [8] K. Johnson Comparing high resolution oscilloscope design approaches wr. / White paper, Teledyne LeCroy, 24.07.2018. Электронный ресурс: <http://cdn.teledynelecroy.com/files/whitepapers/comparing-high%20resolution-oscilloscope-design%20approaches-wp.pdf>.
- [9] WavePro HD. На английский яз.. Электронный ресурс: <http://cdn.teledynelecroy.com/files/pdf/waveprohd-datasheet.pdf>.
- [10] WavePro HD На русском языке. Электронный ресурс: <https://prist.ru/upload/iblock/d3b/d3bd925c8a14868481b96da1a63e2279.pdf>.

Двухосное поворотное устройство для калибровки БИНС

А. В. Полушкин, И. В. Слистин, Д. Г. Борчанинов,
С. Ф. Нахов
Филиал ФГУП «НПЦАП – «ПО «Корпус»
г. Саратов, Россия
nil231@korporus64.ru

А. С. Казаков, И. Е. Виноградов
ФГУП «Научно-производственный центр автоматики и
приборостроения имени Н.А. Пилюгина»
г. Москва, Россия
otd082@npcap.ru

Аннотация—Работа посвящена особенностям создания двухосного автоматизированного поворотного устройства (АПУ) для калибровки и верификации параметров бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), методом проверки соответствия его технических характеристик требованиям ТЗ. Уделено внимание его конструктивным особенностям и системе управления приводами разворотов в заданные угловые положения. На примере БИНС навигационного класса точности показана пригодность АПУ к проведению испытаний приборов.

Ключевые слова — двухосный поворотный стенд; БИНС; электропривод; угловой энкодер; контроллер управления; средства испытаний

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) получили самое широкое распространение для систем управления различными движущимися объектами. Этому в немалой степени способствовал прогресс в области микроэлектроники и вычислительной техники. В НПЦАП им. академика Н. А. Пилюгина создаются, вместо гиростабилизированных платформ, БИНС нового поколения и интегрированные инерциально-астропутниковые системы на базе бесплатформенных инерциальных блоков (БИБ). БИБ имеет меньшие габариты и массу, обладает пониженным энергопотреблением и менее затратен в изготовлении, при этом сохраняются высокие точностные характеристики прибора. Выигрыш по массе, габариту и энергопотреблению, возможность комплексирования с другими видами систем (магнито-, радио-, астронавигационные и т.д.), использование вычислительных возможностей современных бортовых компьютеров с применением самых разнообразных алгоритмов обработки информации и программного внесения поправок - все это делает привлекательным использование БИНС для решения самых разных навигационных задач.

В настоящее время производством БИНС занимается много фирм, как в России, так и за рубежом. Необходимость создания высокоточных алгоритмов БИНС, обеспечивающих численное решение навигационных уравнений, являющихся в свою очередь моделью уравнений движения, привели к построению специальных численных методов в теоретической механике. Параллельно совершенствуется математический аппарат и методы для контроля и калибровки данного вида приборов. В периодических изданиях за последние годы появилась серия публикаций,

посвященных способам калибровки БИНС, в которых специалисты ведущих научных центров и производств, занимающихся разработкой и выпуском БИНС, делятся достигнутыми результатами [1-10].

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обычно для калибровки БИНС используют многоосные поворотные стенды. Разработанные методы позволяют проводить калибровку с использованием точных и грубых стендов с двумя или тремя осями вращения. Есть ряд публикаций, в которых предлагаются методики испытаний на одноосных поворотных стендах. Использование для этой задачи точных стендов имитации движения предполагает более простой алгоритм проверок, но их чрезвычайно высокая стоимость заставляет производителей БИБ искать пути снижения затрат на испытательное оборудование. При использовании более дешевых грубых поворотных стендов методики проведения проверок усложняются, предъявляются более высокие требования к автоматизации процесса испытаний, алгоритмам обработки информации и вычислительному аппарату рабочего места.

Традиционно для калибровки БИНС используют серийно выпускаемые поворотные стенды ведущих зарубежных фирм (Acutronic и Acuitas, Швейцария; iXBlue и Actidyn Systemes, Франция; Ideal Aerosmith США), сейчас появился ряд зарубежных и отечественных фирм, активно занимающих рынок поставки поворотных стендов. Стоимость такого испытательного оборудования составляет десятки миллионов рублей. При развертывании серийного производства БИНС и оснащении всех рабочих мест такими стендами затраты становятся колоссальными. Проведенный анализ стоимости подготовки производства показал целесообразность разработки собственного автоматического двухосного поворотного устройства, к которому не предъявляются такие высокие требования по точности разворота и который имеет существенно более низкую себестоимость изготовления (в 3-6 раз ниже зарубежных образцов). Кроме того, необходимо обеспечить его тиражируемость с использованием производственных мощностей предприятия. Создание двухосного поворотного стенда было поручено саратовскому филиалу (ПО Корпус), а за разработку методов контроля и алгоритмов обработки информации взялись специалисты Центра им. академика Н. А. Пилюгина.

III. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПОВОРОТНОЕ УСТРОЙСТВО

АПУ представляет собой двухосный поворотный стенд (ПС), блок питания и управления (БПУ), источник бесперебойного питания (ИБП) и комплект кабелей. Внешний вид АПУ представлен на рис. 1. Функционально-кинематическая схема, поясняющая принцип его работы, представлена на рис. 2.



Рис. 1. Внешний вид АПУ.

ПС осуществляет развороты БИНС в требуемые угловые положения. Внутренняя и внешняя оси (оси крена и тангажа, соответственно) могут совершать развороты на углы 360° от нулевого положения, как по часовой стрелке, так и против нее. При этом максимальная погрешность задания углов разворота вокруг оси ОХ и ОZ не выходит за пределы $\pm 30'$. Скорость разворота в следующее угловое положение программно вычисляется в зависимости от установленного времени разворота. В соответствии с техническим заданием, ПС должен обеспечивать диапазон угловых скоростей разворота $\pm 30^\circ/\text{с}$. Управление разворотами осуществляется следящими приводами, установленными на каждой оси. Информация с приводов внутренней и внешней рам передается по последовательному интерфейсу RS485 в БПУ. Конструкция поворотного стенда позволяет осуществлять привязку приборной системы координат с географической с погрешностью в пределах $\pm 30'$.

БПУ осуществляет:

- управление режимом работы стенда (автономный – оператором с помощью джойстика управления или дистанционный – от ПЭВМ);
- приём и обработку информации от приводов внутренней и внешней рам ПС;
- отображение на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ) – дисплее, режимов работы и состояния АПУ;
- соединение с ПЭВМ по последовательному интерфейсу RS485;
- формирование напряжений, необходимых для питания внутренних электронных блоков и приводов ПС;

- анализ аварийных ситуаций и отключение питания приводов при срабатывании конечных выключателей или ручной остановки работы оператором.

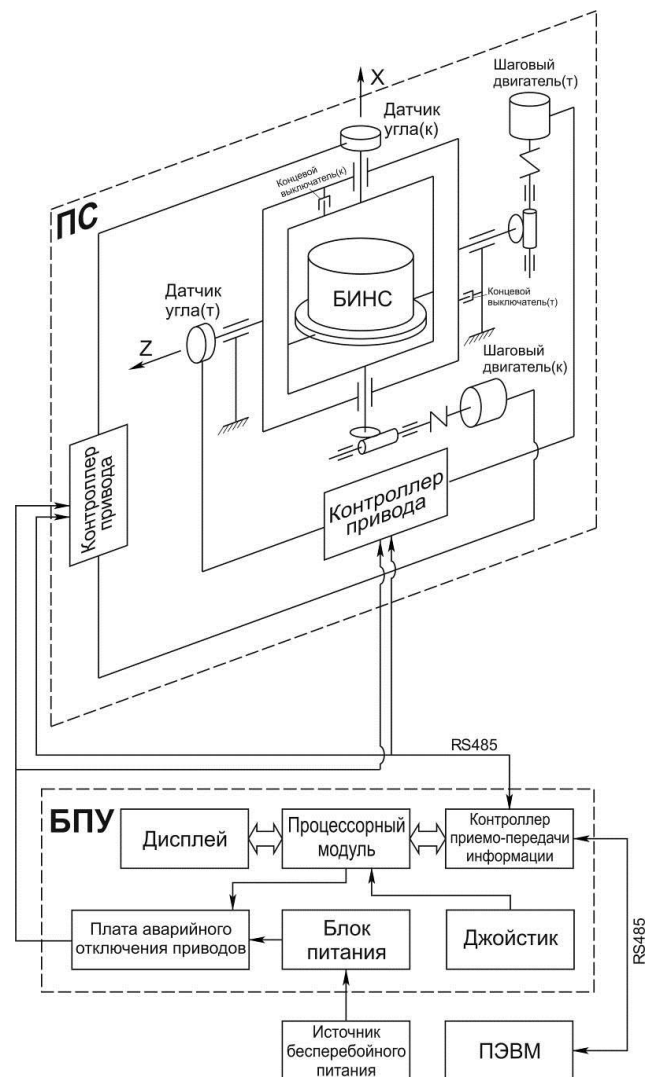


Рис. 2. Функцио-кинематическая схема двухосного поворотного стенда.

Более подробно конструктивные особенности АПУ рассмотрены в [11,12].

IV. ИСПЫТАНИЯ БИНС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА

В настоящее время известно достаточно большое количество методов калибровки БИНС на грубых и точных поворотных устройствах [1-10]. Рассмотрение преимуществ и недостатков этих методик не входит в поставленную задачу, которая направлена на подтверждение возможности применения автоматического поворотного устройства для контроля БИНС различного назначения.

В Центре им. академика Н.А.Пилюгина разработана методика испытаний БИНС, с ортогональным расположением измерительных осей (см. рис. 3), короткая позволяет использовать двухосное поворотное устройства невысокой точности. БИБ выполнен на трех волоконно-оптических гироскопах и акселерометрах.

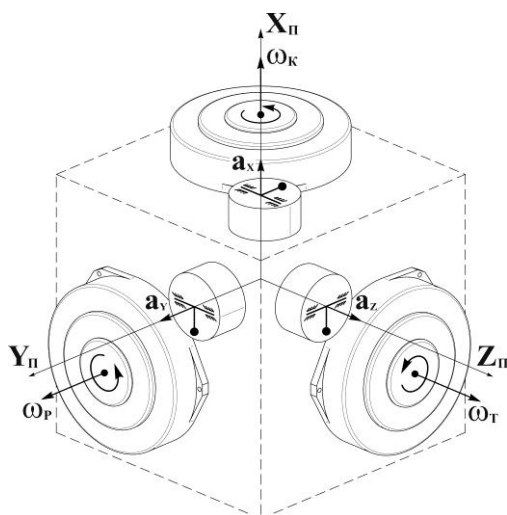
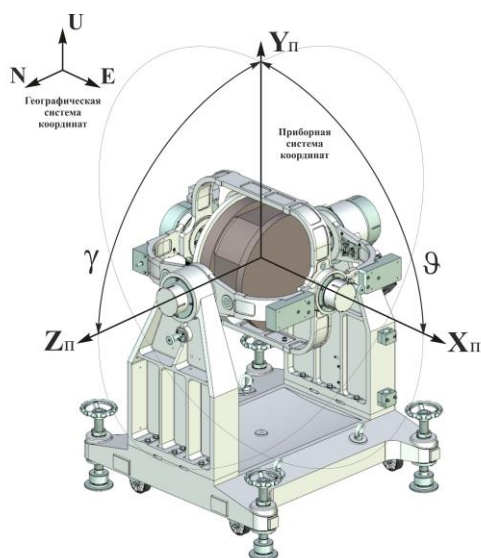


Рис. 3. Схема расположения чувствительных элементов БИНС
 a_K – измерительная ось акселерометра; ω_K – измерительная ось ДУС_К
 a_T – измерительная ось акселерометра; ω_T – измерительная ось ДУС_Т
 a_P – измерительная ось акселерометра; ω_P – измерительная ось ДУС_Р

Для оценки работоспособности БИНС методика предусматривает проведение серии разворотов, представленных в табл. 1, в каждом из которых производится съем выходного сигнала с помощью контрольно-испытательной аппаратуры (КИА) прибора. Рис. 4 поясняет схему разворотов прибора, установленного на АПУ.

В табл. 1 первые 4 режима испытаний не предусматривают расчета вектора кажущейся скорости (ВКС); вторые 7 – проводятся в режиме, в котором предусматривается начальное определение ориентации БИНС относительно плоскости местного горизонта, прицеливание приборной системы координат БИНС и последующий расчет вектора кажущейся скорости.

По результатам режима 1 определяется работоспособность X – акселерометра, при необходимости, учитываются его точностные параметры: смещение нуля и масштабный коэффициент, уточняется систематическое значение ДУС_К.



θ – угол разворота по тангажу; γ – угол разворота по крену

Рис. 4. Схема разворотов БИНС на АПУ.

ТАБЛИЦА 1

Режим	Угловое положение осей АПУ	
	γ (ось крена)	θ (ось тангажа)
1	0°	0°
	0°	180°
2	0°	270°
	180°	270°
3	270°	270°
	90°	270°
4	0°	315°
	270°	315°
5	2°	272°
6	2°	272°
	90°	272°
	2°	272°
7	2°	272°
	2°	0°
	2°	272°
8	88°	272°
	88°	0°
	88°	272°
9	358°	272°
	270°	272°
	358°	272°
10	2°	268°
	2°	180°
	2°	268°
11	88°	268°
	88°	180°
	88°	268°

По результатам режима 2 определяется работоспособность Y – акселерометра, при необходимости, учитываются его точностные параметры: смещение нуля и масштабный коэффициент, уточняется систематическое значение ДУС_Р.

По результатам режима 3 определяется работоспособность X – акселерометра, при необходимости, учитываются его точностные параметры: смещение нуля и масштабный коэффициент, уточняется систематическое значение ДУС_Т.

По результатам режима 4 подтверждаются точностные параметры акселерометров (смещение нуля, масштабные коэффициенты, взаимные углы между измерительными осями (ИО) акселерометров X и Y , между ИО акселерометров X и Z), систематические значения углов ДУС.

По результатам режима 5 подтверждаются точностные параметры акселерометров и дополнительно калибруется уход ДУС_Т.

По результатам режимов 6, 9 уточняется масштабный коэффициент ДУС_К и углы ориентации ДУС.

По результатам режимов 7, 10 уточняется масштабный коэффициент ДУС_Т и углы ориентации ДУС.

По результатам режимов 8, 11 уточняется масштабный коэффициент ДУС_Р и углы ориентации ДУС.

Проведенные испытания подтвердили:

- нормальную работу комплекса АПУ-КИА-БИНС;
- работоспособность предложенной методики;
- АПУ обеспечивает требуемые режимы разворотов и точности;

- возможность программных разворотов АПУ в угловые положения предусмотренные методикой.

В соответствии с методикой проверки БИНС перед началом испытаний ПС должен быть выставлен по сторонам света (см. рис. 5). Выставка в азимут была проведена с помощью прибора (высокоточного гирокомпаса разработанного и выпускаемого Центром им. академика Н.А.Пилюгина – ГКР-1). Ориентация осей поворотного стола после выставки в азимут соответствует ориентации, приведенной на рис. 4.

Рамы ПС установлены в исходное положение (см. рис. 6), при этом показания датчиков угла (экодер), установленных по осям X (крена) и Z (тангажа) составляют $0^\circ \pm 4'$.

Площадки А, Б, В, Г предназначены для выставки и контроля осей ПС.

На платформу ПС последовательно устанавливается уровень с ценой деления $10''$ в двух взаимно перпендикулярных направлениях, с помощью трех выставочных винтовых опор ПС, было отрегулировано горизонтальное положение платформы.

Точность взаимного расположения осей ПС и его базовых поверхностей было обеспечено выполнением операций конструкции в сборе на обрабатывающем центре. Затем это было перепроверено на контрольно-измерительной машине (погрешность не превышает 2 мкм).

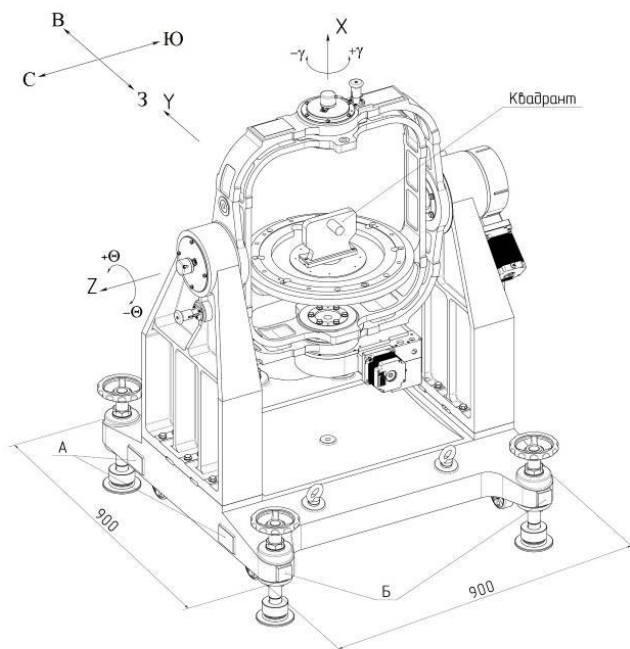


Рис. 5. Выставка платформы ПС в азимут и горизонт.

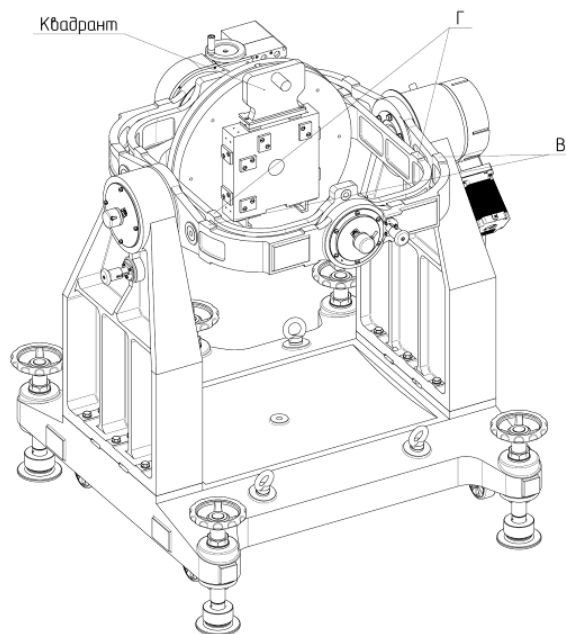


Рис. 6. Исходное положение АПУ при испытаниях прибора.

В результате начальной выставки платформы ПС имеет:

- исходное (горизонтальное) положение с точностью не хуже $15''$;
- отклонение базисных элементов от направления в азимут – $1'$.

Для проверки точности согласования системы координат ПС и приборной системы координат применялся эквивалент осей прибора (рис. 7), который выполнен в виде диска с посадочными поверхностями аналогичными проверяемому прибору. На диске закреплена призма с пластинами строго ориентированными по осям прибора. Перед проведением испытаний с эквивалентом осей прибора, проведена проверка на КИМ отклонения его базовых поверхностей от номинальных значений, установленных в чертеже. Проверка показала, что непараллельность пластинок не более 11 мкм, неперпендикулярность пластинок не более 3 мкм. Данные отклонения приводят к угловой погрешности не превышающей $17''$.

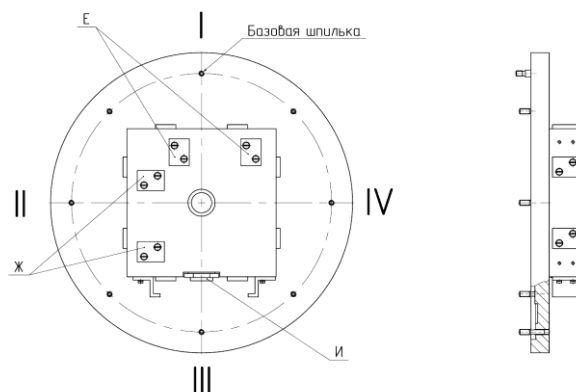


Рис. 7. Эквивалент осей прибора.

Погрешность эквивалента (перпендикулярность плоскости платиков III к линии, проведенной через базовую шпильку и центр посадочного диаметра) равна $6'46''$.

Непараллельность платиков III к плоскости зеркала II не превышает $0,02\text{мм}$ ($1'$).

Примечание. При выставке ПС с помощью теодолита по зеркалу II погрешность выставки в азимут не будет превышать $8'$, что обусловлено требованиями ТЗ на точность изготовления базовых элементов прибора.

В исходном положении на платформу закреплен эквивалент осей прибора. Устанавливая уровень с ценой деления $10''$ на площадке Е и Ж (см. рис. 6), проверили соответствие горизонтальному положению платформы ПС, измерения показали что их отклонение от горизонта не превышает $20''$. Далее были проверены аналогичные проверки при установке уровня на пластики граней I, II, III, IV с соответствующими разворотами ПС по крену и тангажу. Результаты измерений представлены в табл. 2. Дополнительно проведен контроль точности угловых положений после разворота ПС по тангажу на 180° .

Для проверки обеспечения разворотов в заданные угловые положения за назначенное время с проверяемым технологическим прибором были по программе заданы последовательно угловые положения согласно табл. 5. При этом контролировались фактическое угловое положение в точке разворота по датчикам угла крена и тангажа АПУ, а также время, затраченное на разворот в данное угловое положение. Протокол разворотов выводится на дисплей.

ТАБЛИЦА 2

Ось Z	Ось X	Показание уровня, ...'		
		Исходное	Повернут на 180°	Среднее
0°	0°	По направлению оси Z		
		-0,5	+1,5	+1
0°	0°	По направлению оси Y		
		+1	-1	0
0°	0°	Вращение вокруг оси X		
		+1	-1	0
0°	90°	+1	-1	0
0°	180°	+1,25	0	+0,62
0°	270°	+1,5	0	+0,75
0°	360°	+1	-1	0
180°	0°	0	+2	+1
180°	90°	+2	0	+1
180°	180°	+3	+1	+2
180°	270°	+0,5	+2	+1,25
180°	360°	0	+2	+1

Проведена проверка погрешности измерения угла при выставке в заданные угловые положения с помощью эквивалента осей прибора по осям X (крена) и Z (тангажа) при этом на пластики Ж и пластики грани III крепился квадрант КО-1 ТУ 3-3.179-81. Результаты испытаний сведены в табл. 3, 4. Проверка показала, что рассогласование угловых положений, измеренных квадрантом, установленным на пластики эквивалента осей прибора и датчика угла, соответствующей оси не превышает $5'$.

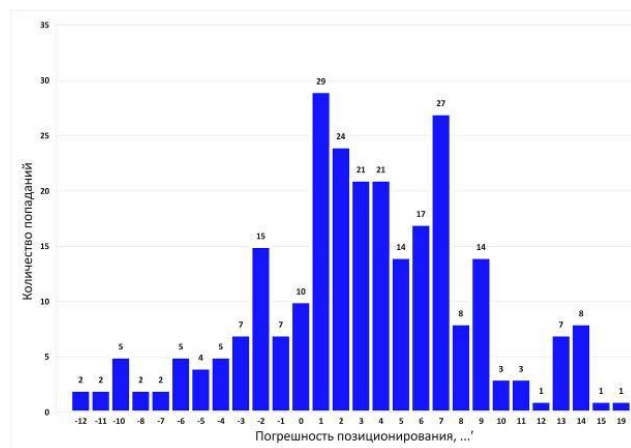
ТАБЛИЦА 3. - ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ ЭНКОДЕРА ОСИ X

Заданный угол (грань) Эквивалента	Показание энкодера	Погрешность
0°	$0^\circ 0' 0''$	$0^\circ 0' 0''$
90°	$89^\circ 56' 45''$	$0^\circ 3' 15''$
180°	$179^\circ 56' 45''$	$0^\circ 3' 15''$
270°	$269^\circ 57' 50''$	$0^\circ 2' 10''$
360°	$0^\circ 0' 0''$	$0^\circ 0' 0''$

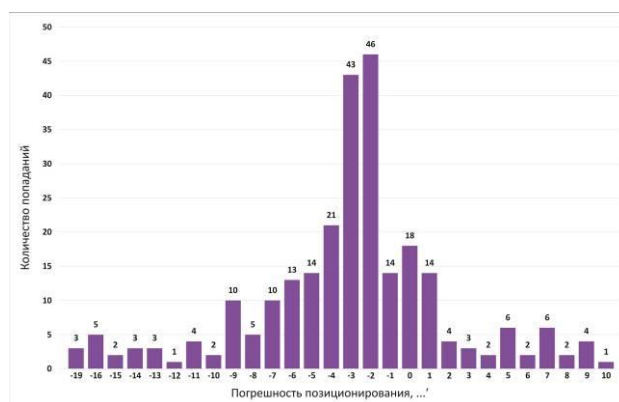
ТАБЛИЦА 4. - ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ ЭНКОДЕРА ОСИ Z

Заданный угол	Показание энкодера	Погрешность
0°	$0^\circ 1' 4''$	$0^\circ 1' 4''$
90°	$89^\circ 55' 40''$	$0^\circ 4' 20''$
180°	$179^\circ 57' 50''$	$0^\circ 2' 10''$
270°	$269^\circ 56' 45''$	$0^\circ 3' 15''$
360°	$0^\circ 2' 9''$	$0^\circ 2' 9''$

Затем проводилась проверка БИНС с контролем параметров в каждом угловом положении. При этом проверяемый прибор с помощью АПУ устанавливался в 16 угловых положений, было проведено 16 циклов испытаний, отраженных в табл. 5. Диаграмма распределения погрешности позиционирования по углам крена и тангажа представлена на рис. 8а, рис. 8б, соответственно.



а) распределения погрешности позиционирования по углам крена



б) распределения погрешности позиционирования по углам тангажа

Рис. 8. Диаграмма распределения погрешности.

Испытания дали положительный результат. В ходе отладки АПУ внесен ряд доработок, которые позволили не только обеспечить его надежную работу под управлением как встроенного программного обеспечения (автономное

управление разворотами), так и внешнего ПО, установленного в АРМ или тестирующего ПО, разработанного для компьютера, имитирующего работу АРМ. Кроме того, в ходе проведенных доработок удалось выявить конструктивные запасы по возможности обеспечения более широкого диапазона задаваемых угловых скоростей от 2,5 до 70°/с, при этом статистическая обработка результатов испытаний показала, что 95 % из задаваемых угловых положений (выборка по 270 данным) находятся в пределах $\pm 10'$, что в 3 раза меньше допуска, установленного в техническом задании. В настоящий момент продолжаются работы по усовершенствованию конструкции АПУ и алгоритмов управления.

ТАБЛИЦА 5

№ п/п	Угловое положение				Время разв., сек
	Угол разворота по крену		Угол разворота по тангажу		
	Задан- ное...°	Ошибка познц.	Заданное ...°	Ошибка познц.	
0	0	0°02'09"	0	0°06'29"	—
1	0	0°02'09"	180	0°04'19"	9,0
2	0	0°01'04"	-90	0°01'05"	^a
3	180	0°07'34"	-90	0°01'05"	9,0
4	-90	0°12'57"	-90	0°01'05"	^a
5	90	0°01'05"	-90	0°01'05"	9,0
6	0	0°02'09"	-45	0°02'10"	^a
7	-90	0°01'04"	-45	0°01'05"	5,0
8	2	0°13'55"	-88	0°02'17"	^a
9	2	0°13'55"	-88	0°02'17"	^a
10	90	0°06'28"	-88	0°02'17"	5,0
11	2	0°05'32"	-88	0°02'17"	5,0
12	2	0°05'32"	0	0°18'22"	5,0
13	2	0°05'32"	-88	0°05'32"	5,0
14	88	0°02'16"	-88	0°05'32"	^a
15	88	0°02'16"	0	0°20'32"	5,0
16	88	0°02'16"	-88	0°03'22"	5,0

Время не регламентируется

V. Выводы

Таким образом, можно отметить, что создан опытный образец АПУ, проверен по методике контроля параметров БИНС, разработанной в НПЦАП. Конструктивное исполнение АПУ, позволяет устанавливать на платформу ПС приборы достаточно больших габаритов и массы, предусмотренные на платформе сменные диски для базирования прибора дают возможность потребителю изготовить их под конкретный прибор. Разработанное программное обеспечение включает в себя открытый протокол обмена, что позволяет достаточно быстро интегрировать АПУ в АРМ практически любого БИНС.

Учитывая, что созданный ПС имеет удачную конструкцию, он может стать прототип для создания серии многоосных поворотных стендов для испытаний различных изделий.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Diesel, J.W. Calibration of a Ring Lazer Gyro Inertial Navigation Systems, Proceedings of the 13th Biennial Guidance Test Symposium, Vol. 1, 1987, Holloman AFT, New Mexico.
- [2] Быковский, А.В. Метод калибровки бесплатформенной инерциальной навигационной системы // М.: Вестник МГТУ

им. Н.Э. Баймана. Навигационные и гироскопические системы №1(33), 1999, ISSN 0236-3941.

- [3] Измайлов, Е.А. Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Е.А. Измайлов, С.Н. Лепе, А.В. Молчанов, Е.Ф. Поликовский // XV Международная конференция по интегрированным навигационным системам, СПб., 2008. С. 145 – 154.
- [4] Пазычев, Д.Б. Балансировка бесплатформенной инерциальной навигационной системы среднего класса точности // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование» №3, 2011, <http://technomag.edu.ru>, Эл. №ФС77-3069. Государственная регистрация №0421100025, ISSN 1994-0408.
- [5] Виноградов, И.Е. Методика определения параметров инерциальных измерительных блоков / И.Е. Виноградов, А.С. Капустин, Е.С. Смирнов, О.Н. Шестаков // Труды Международной научно-технической конференции «Системы и комплексы автоматического управления летательных аппаратов», посвященной 105-летию со дня рождения ака-демика АН СССР Н.А. Пилюгина, Москва, 2013. – С.122–128.
- [6] Виноградов, И.Е. Методика определения параметров инерциальных измерительных блоков с неортогональным направлением измерительных осей на прецизионном поворотном столе с двумя степенями свободы / И.Е. Виноградов, А.С. Капустин, Е.М. Тюгова // Труды VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, Москва, 2015. – С.194-203.
- [7] Вавилова, Н.Б. Калибровка в инерциальной навигации / Н.Б. Вавилова, И.А. Васинева, А.А. Голован, А.В. Козлов, И.А. Папуша, Н.А. Парусников // Фундаментальная и прикладная математика. Т. 22, № 2, 2018.
- [8] Климкович, Б.В. Калибровка БИНС в инерциальном режиме. Объединение скоростного и скалярного методов // Гироскопия и навигация №3 (86), 2014.
- [9] Николаев, С.Г. Моделирование калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем / С.Г. Николаев, Ю.В. Ившина // Перспективы наука №2(65), 2015.
- [10] Николаев, С.Г. Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Изв. Вузов. Приборостроение Т.52, №7, 2009.
- [11] Полушкин, А.В. Результаты разработки и испытания автоматизированного рабочего места для верификации точностных характеристик БИНС / А.В. Полушкин, И.Е. Виноградов, А.А. Гуляев, Е.С. Доценко, А.С. Казаков, А.В. Полушкин, И.В. Слистин, А.Е. Степанова, И.А. Назаров // Труды ФГУП «НПЦАП» научно-технический журнал №1, Москва, 2018.
- [12] Полушкин, А.В. Автоматизированное поворотное устройство для верификации точностных характеристик БИНС / А.В. Полушкин, И.А. Назаров, И.В. Слистин, С.А. Чернов, Д.Г. Борчанинов, С.Ф. Нахов, А.С. Казаков, И.Е. Виноградов, П.К. Плотников, Ю.А. Захаров // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2018. С.307-312.

Особенности совместного использования нескольких метрологически аттестованных измерительных систем с программным обеспечением

А. В. Полушкин,
Д. Г. Борчанинов, С. Ф. Нахов
Филиал ФГУП «НПЦАП –
«ПО «Корпус»
г. Саратов, Россия
nil231@korpuss64.ru

Р. М. Юмагузин, А. С. Максаев
ФГУП «Научно-производственный
центр автоматики и приборостроения
имени академика Н.А. Пилюгина»
г. Москва, Россия
maksaev.a@gmail.com

А. А. Янковский
ФГУП «ВНИИМ имени
Д.И. Менделеева»
г. Санкт-Петербург, Россия
a.yankovsky@vniim.ru

Аннотация—В данной работе, на примерах создания автоматизированных рабочих мест для контроля параметров навигационных приборов и их элементов, рассмотрен опыт создания системы, обеспечивающей взаимодействие стандартных измерительных приборов и внесенных в государственный реестр средств измерений (СИ) собственной разработки. При этом уделено внимание требованиям к программному обеспечению каждого из СИ и алгоритмам их совместной работы без модификации метрологически значимой части. На примере, разработанных на предприятии двух типов прецизионных углозадающих поворотных столов, рассмотрены подходы к созданию на их базе автоматизированных рабочих мест (АРМ). При этом уделено внимание конструктивным, схемным и программным решениям, позволившим решить в короткие сроки эту задачу. Сформулированы конкретные рекомендации по разработке встраиваемого в измерительные системы программного обеспечения (ПО), а также предложены способы защиты метрологически значимой части ПО от изменений в процессе эксплуатации.

Ключевые слова—средства измерения; математическая и статистическая обработка; измерительные системы; программное обеспечение; метрологическая аттестация; база данных; компьютерная сеть; алгоритмическая компенсация; интерфейсы обмена

I. ВВЕДЕНИЕ

Высокие требования, предъявляемые к современным средствам измерения, приводят к необходимости включать в их состав не только высокоточные преобразователи, но и процессорные модули. Такие модули синхронизируют режим измерений, управляют работой преобразователей и осуществляют пост обработку полученной информации, в том числе цифровую фильтрацию, алгоритмическую компенсацию систематических погрешностей, допусковый контроль, статистические вычисления, выводят на графический индикатор и печатающее устройство информацию в удобном для оператора виде, а также передают ее в ПЭВМ для окончательной обработки, архивации и хранения.

Современные стандартные измерительные приборы – это измерительные системы с большими функциональностями

возможностями, включающими в себя высокоточные преобразователи, мощные процессоры и программное обеспечение, реализующее сложные алгоритмы обработки информации и удобный интерфейс пользователя. Часто для решения нестандартных задач, возникающих в исследовательских работах, приходится объединять несколько стандартных и уникальных измерительных приборов и разрабатывать под конкретную задачу алгоритмы их взаимодействия и обработки результатов. Затем путем анализа и сопоставления данных, полученных из нескольких источников, исключать недостоверную информацию, находить инструментальные и методические ошибки, а также выводить аналитические зависимости для систематических погрешностей. опытом решения такого типа задач мы решили поделиться в этой статье.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для налаживания взаимодействия нескольких измерительных приборов, используемых в экспериментах, требуется намного больше усилий и времени по сравнению с проведением измерений каждым прибором по отдельности. Учитывая огромное многообразие СИ, тысячи производителей в России и за рубежом, задача осложняется отсутствием унифицированного ПО на эти средства измерения. В связи с этим, при объединении приборов в измерительный комплекс можно столкнуться с проблемой их аппаратной и программной несовместимости. Кроме того, при объединении отдельных аттестованных средств измерения в измерительную систему необходимо учитывать требования [1,2,3] в части их программного и аппаратного взаимодействия, исключающего внесение изменений в метрологически значимую часть ПО, искажение результатов измерения и обработки информации.

Согласно [1-3] в программном обеспечении СИ должна быть выделена метрологически значимая часть. К ней в соответствии с [3] относятся программы и программные модули, выполняющие функции сбора, передачи, обработки, хранения и представления измерительной информации, а также параметры, характеризующие тип средства измерения и внесенные в программное обеспечение. Часть этого ПО после проведения аттестации становится

законодательно контролируемой, остальное программное обеспечение – законодательно не контролируемое [2]. Переменные или параметры, выполняющие вспомогательные функции (например: подпрограммы, библиотеки, процедуры взаимодействия с операционной средой и периферийными устройствами персонального компьютера (кроме СИ)) – аттестации не подлежат и могут быть модифицированы без уведомления уполномоченных органов [1]. В случае, если не может быть произведено разделение ПО, оно все назначается метрологически значимым и подлежит аттестации. Любая модификация метрологически значимой части ПО приводит к изменению его идентификации и необходимости его повторной аттестации с внесением изменений в описание типа СИ и тем самым, автоматически подпадает под законодательный контроль.

Кроме того, при разработке программного обеспечения для средств измерения необходимо соблюдать требования:

- к идентификации ПО;
- к исключению влияния на метрологически значимую часть ПО через интерфейс пользователя и через интерфейс связи;
- к взаимодействию между метрологически значимыми и незначимыми частями программного обеспечения;
- к защите программного обеспечения и данных от искажений и сбоев, нарушающих целостность ПО и данных;
- специальные требования к ПО, в том числе требования к его обновлению и загрузке, требования к хранению данных и их передаче через сети коммуникаций.

Учитывая, что современные средства измерения являются сложными измерительно-вычислительными системами, над программным обеспечением для которых работает целый штат высококвалифицированных программистов, анализ программного кода на соответствие требованиям ГОСТ [2,3], тестирование, выявление и устранение несовершенства ПО становится задачей не менее трудоемкой, чем разработка самого проверяемого ПО. Современный взгляд на проблемы аттестации программного обеспечения СИ и измерительных систем изложен в [4,5].

В ФГУП «НПЦАП им. академика Н.А. Пилюгина» накоплен опыт создания и аттестации измерительных приборов различного назначения с встроенным программным обеспечением. Из них стоит выделить два вида прецизионных углозадающих поворотных столов: цифровой поворотный стол СПЦ-383 и углозадающий комплекс УК, предназначенные для автоматического задания и измерения плоского угла. Учитывая, что они созданы специалистами разных подразделений предприятия, представляет интерес рассмотреть два подхода к разработке ПО для них. На базе этих столов внедрена серия автоматизированных рабочих мест на производственных участках предприятия. При этом для создания в короткий срок нового АРМ контроля параметров следующего изделия, требовалось подключение к поворотному столу дополнительного оборудования. Перед разработчиками поворотных столов стояла задача: нахождение компромисса меж-

ду неизменной метрологически значимой частью ПО и возможностью его быстрой адаптации под новый алгоритм проверок. Задача была успешно решена двумя способами. Принципы построения программного обеспечения, позволяющего осуществлять взаимодействие ПС с измерительными приборами различного назначения (автоколлиматоры, мультиметры, частотомеры, таймеры и т.п.) изложены в статье.

III. Цифровой поворотный стол СПЦ-383

Цифровой поворотный стол СПЦ-383 предназначен для высокоточных заданий и измерений угла в горизонтальной или вертикальной плоскостях. Он состоит из механической части - поворотного стола СП-382 и электронного блока - блока управления БУ-226 (см. рис. 1).



Рис. 1. Цифровой поворотный стол СПЦ-383.

Поворотный стол СП-382 имеет простую кинематическую схему и включает в себя: автоматический привод, высокоточный оптический датчик угла. Блок управления БУ-226 выполнен на базе одноплатного компьютера, который обеспечивает математическую обработку результатов измерения с выдачей информации на устройства ввода-вывода. В него также входит процессорный модуль КП-018, выполненный на мощном DSP контроллере. Подробнее конструкция описана в [6-8]. Технические характеристики СПЦ-383 приведены в табл. 1.

Встроенное программное обеспечение блока управления БУ-226 состоит из двух частей:

- программы блока процессорного модуля КП-018;
- программы процессорного модуля (одноплатного компьютера) БУ-226 блока.

Процессорный модуль КП-018 осуществляет прием информации с датчика угла, ее обработку, управление вращением шагового двигателя на основании информации об угле разворота платформы, прием и обработку информации о частоте и фазе сигнала на входах «СТАРТ» и «СТОП».

Одноплатный компьютер блока БУ-226 «СПЦ-383» осуществляет взаимодействие с оператором, индикацию параметров на графическом дисплее, обмен с внутренними электронными блоками, сохранение результатов измерений на встроенный твердотельный накопитель, взаимодействие с внешними измерительными приборами и удаленными ПЭВМ по стандартным интерфейсам, имеющимся в его составе блока БУ-226.

Таблица 1. Технические характеристики СПЦ-383

Наименование параметра	Норма параметра
Диапазон измеряемых углов, ...°	±360
Управление	ручн./авт./программное
Положение оси вращения	гориз./вертик. ^а
Тип датчика угла	оптический инкрементный
Погрешность измерения углов, не более, ..."	±0,35
Разрешающая способность, ..."	0,05
Погрешность позиционирования, не более, ..."	±1 ±0,2
автоматический режим	
ручной режим	
Масса испытуемого прибора, не более, кг	50/30 ^б
Номер в Государственном реестре СИ	56458-14
Масса, стол/блок управления, кг	75/15**
Габариты, мм:	410x250x360 386x405x231
стол	
блок управления	

^аобеспечивается переустановкой

при вертикальном положении оси вращения /при горизонтальном положении оси вращения

Для автоматизации процесса контроля параметров приборов на рабочих местах, выполненных на базе цифрового поворотного стола, был предложен механизм сценариев и разработана специальная база данных (БД). Сценарий позволяет в зависимости от алгоритма испытаний задать:

- количество исполняемых секций (секция - однотипные развороты одного этапа испытаний);
- три способа разворота поворотного стола:
 - а) смещение относительно текущей угловой позиции,
 - б) смещение в заданное относительное угловое положение,
 - в) смещение в заданное абсолютное угловое положение.
- последовательность угловых положений, в которые устанавливается проверяемый прибор;
- шаг и количество шагов между угловыми положениями;
- подключение динамических библиотек для работы с одним или несколькими внешними устройствами;
- выдержку временного интервала по достижению начального, конечного и промежуточного углового положения;
- вывод информационных сообщений в начале выполнения сценария по завершению исполняемой секции, а также по завершению выполнения сценария в целом.

Примеры использования механизмов сценариев подробно рассмотрены в [9].

В процессе выполнения сценариев вся информация с поворотного стола и проверяемого прибора автоматически заносится в БД. Для удобства пользователя в поставляемое ПО включен программный модуль, обеспечивающий чтение результатов из БД, с возможностью сохранения их в текстовые файлы или табличные редакторы.

Управление поворотным столом от внешних измерительных систем не предусмотрено. Это связано с выполнением требований п. 4.5 ГОСТ Р 8.654-2015.

В процессе разработки поворотного стола СПЦ-383 и его программного обеспечения предусмотрены следующие виды защиты:

- аппаратная блокировка изменения ПО (конструкция обеспечивает невозможность замены микроконтроллера и перепрограммирования его без нарушения целостности пломб);
- наличие энергонезависимой памяти с защитой от несанкционированного изменения сохраненных данных (строгое разграничение прав доступа к БД);
- проверка целостности ПО в процессе загрузки и работы (при загрузке ПО производится сверка цифрового идентификатора программного обеспечения, при сбое выдается ошибка и загрузка останавливается, а также в процессе функционирования контролируется передача данных по стандартным интерфейсам путем вычисления цифрового идентификатора в каждой посылке. Возможность изменения или искажения ПО и результатов измерений с помощью команд и данных, вводимых через интерфейс пользователя во время проведения измерений, отсутствует).

Кроме того, для дополнительной защиты данных в процессе испытаний была предусмотрена запись «сырых» результатов измерений в log-файл, доступный только разработчикам. При необходимости результаты измерений, сохраненные в БД, могут быть сопоставлены с данными из log-файла.

В ПО предусмотрено резервное копирование БД на удаленный компьютер. За рабочую смену по расписанию происходит неоднократное сохранение базы данных с каждого рабочего места производственного участка на центральный компьютер.

В настоящее время внедрено более 15 рабочих мест на базе СПЦ-383:

в интегрированной структуре «НПЦАП имени Н.А. Пилюгина»:

- АРМ контроля параметров вращающихся трансформаторов и индукционных редуктосинов различного класса точности;
- АРМ проверки некруглости магнитопроводов (роторов, статоров) индукционных датчиков угла;
- АРМ проверки измерителей линейного ускорения.

в ОАО «Всероссийский научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения»:

- АРМ контроля параметров 18-ти разрядного преобразователя машинно-электронного (МЭП);

в ФГБУ «Институт космических исследований Российской академии наук»

- АРМ контроля блока определения координат звезд (звездных датчиков).

Внедренные АРМ имеют различный состав. Приборы, проверяемые на них, испытываются по оригинальным методикам, принятым для каждого типа изделий, с учетом требований технических заданий на конкретную разработку. Примеры использования СПЦ-383 в составе перечисленных АРМ рассмотрены в [9-13].

Внедрение в короткие сроки такого количества АРМ, выполненных на базе СПЦ-383, стала возможным за счет адаптивного программного обеспечения.

IV. Углозадающий комплекс

Углозадающий комплекс (УК) предназначен для измерения плоских углов с высокой точностью (погрешность измерения угла в пределах $\pm 0,5''$) в диапазоне от 0° до 360° как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскости. УК состоит из поворотного стола (ПС-УК), электронного блока (УВИ-ПС-УК), ПЭВМ, программного обеспечения и комплекта кабелей. При необходимости стационарный компьютер может быть заменен на ноутбук. Внешний вид УК представлен на рис. 2.

Поворотный стол включает в себя планшайбу, установленную в корпусе на шарикоподшипниковой опоре, привод поворота планшайбы, имеющий ручной и автоматический режим работы, двухканальный цифровой позиционный преобразователь угла с калибровкой и коррекцией погрешности по методу частотно-пространственной селекции [14]. Прибор управления и вывода информации обеспечивает УК необходимыми напряжениями, преобразует цифровую информацию дискретного преобразователя угла и передает её по последовательному интерфейсу в ПЭВМ, генерирует импульсы управления шаговым двигателем электропривода. Подробнее устройство и принцип действия УК рассмотрен в [15]. Технические характеристики углозадающего комплекса приведены в табл. 2.



Рис. 2. Внешний вид УК.

Таблица 2. Технические характеристики УК

Наименование параметра	Норма параметра
Диапазон измеряемых углов, ...°	± 360
Управление	ручн./авт./программное
Положение оси вращения	гориз./вертик. ^с
Тип датчика угла	два индукционных абсолютных
Погрешность измерения углов, не более, ..."	$\pm 0,5$
Разрешающая способность, ..."	0,0127
Погрешность позиционирования, не более, ..."	$\pm 2,5$
автоматический режим	$\pm 0,1$
ручной режим	
Масса испытуемого прибора, не более, кг	65/10 ^d
Номер в Государственном реестре СИ	58244-14
Масса, стол/блок управления, кг	45/5
Габариты, мм:	
стол	363x267x116
блок управления	300x160x110

^собеспечивается переустановкой

при вертикальном положении оси вращения /при горизонтальном положении оси вращения

Программное обеспечение УК непрерывно производит опрос преобразователя угла по последовательному интерфейсу связи RS-232, обработку полученной информации, коррекцию измеренного угла по полученным ранее поправочным коэффициентам, вывод угла на экран ПЭВМ в удобном для оператора виде. Кроме того ПО УК осуществляет режим автономной (без использования дополнительных средств измерения) автоматической калибровки комплекса при эксплуатации. Учитывая опыт применения углозадающих поворотных столов в составе автоматизированных рабочих мест (АРМ) было принято решение о том, что УК будет являться составной частью рабочего места, и не будет управляться другими средствами измерения, входящими в его состав. Поэтому задача интеграции УК должна происходить на стадии разработки АРМ. Использование такого подхода не ограничивает разработчиков АРМ в выборе средств измерения и управляющего ПО. Для возможности интеграции УК в АРМ предусмотрен программный интерфейс связи подключения стороннего ПО. Подключение возможно как локально (стороннее ПО выполняется на входящей в состав УК ПЭВМ, так и через интерфейс Ethernet.

Программный интерфейс, описан в эксплуатационной документации УК и содержит 3 команды:

- проверка связи;
- считывание текущего угла поворота планшайбы поворотного стола;
- разворот планшайбы поворотного стола шаговым электродвигателем из текущего углового положения на заданный угол (по часовой стрелке или против часовой стрелки).

Этих команд достаточно для разработки любых, даже достаточно сложных АРМ на базе УК. В настоящее время во ФГУП «НПЦАП» созданы рабочие места:

- универсальные (настраиваемые) РМ для контроля точностных параметров 11 типов индуктивных датчиков угла, изготавливаемых на предприятии;
- РМ контроля погрешности измерения азимута гироскопов;
- РМ контроля параметров гиросtabilизированных платформ.

Программное обеспечение углозадающего комплекса, разработанное с учетом требований ГОСТ [1-3], имеет следующие особенности:

- исполняемый файл (метрологически значимая часть ПО) имеет идентификационные данные (наименование, версия);
- исполняемый файл вычисляет собственную контрольную сумму по алгоритму хеширования MD5 и отображает её на экране ПЭВМ, эталонная контрольная сумма указана в паспорте на прибор;
- файл с поправочными коэффициентами зашифрован и содержит информацию о дате калибровки, фамилию, имя и отчество оператора, проводившего калибровку, контрольную сумму для проверки целостности файла. В случае отсутствия файла с коэффициентами, ПО при запуске выводит на экран ПЭВМ соответствующее предупреждение;
- команды, передаваемые через интерфейсы связи, задокументированы (ПО комплекса возвращает ответ о некорректной команде в случае получения неизвестной команды), проверяются на корректность параметров и целостность.

V. Выводы

В работе рассмотрены возможности объединения в комплекс двух и более измерительных систем с собственным программным обеспечением без нарушения требований по исключению взаимного влияния на результаты измерений, предусмотренных ГОСТ [3]. На примере ПО поворотных столов, разработанных и изготавливаемых на предприятии, рассмотрены возможности программного объединения в нескольких СИ без изменения метрологически значимой части ПО.

Опыт создания СИ, используемых в интегрированных системах, показал, что при разработке ПО для них необходимо:

- тщательно продумывать структуру программного обеспечения с однозначным выделением метрологически значимой части;
- предусмотреть средства защиты ПО и результатов измерений от несанкционированного доступа или искажения в процессе эксплуатации;
- предусмотреть в ПО модуль взаимодействия с дополнительными внешними измерительными приборами. Модуль должен иметь удобный интерфейс

с простой процедурой написания пользователем алгоритмов испытаний;

- зарезервировать достаточное количество полей для хранения данных, полученных в процессе испытаний, в разрабатываемой структуре БД, а также обеспечить защиту их от несанкционированного доступа;
- предусмотреть механизм периодического резервного копирования БД с результатами измерений на удаленный компьютер, после каждого ответственного цикла измерений;
- рассмотреть возможность создания служебного файла для арбитражных проверок достоверности с «сырыми» данными, снимаемыми со всех приборов, включенных в измерительную систему; предусмотреть ограничение доступа к этому файлу;
- разработать специальное тестовое ПО (внешнее или встроенное в ПО СИ), обеспечивающее оперативную верификацию как всей системы, так и отдельных ее узлов;
- включить в комплект поставки систему резервного восстановления ПО после сбоев в процессе эксплуатации.

Таким образом, учет рекомендаций, предложенных выше, при разработке ПО современного измерительного оборудования, позволяет обеспечить защиту метрологически значимого программного обеспечения и получаемых данных, удовлетворяющую высокому уровню (уровень «С» по терминологии, установленной в МИ 3286-2010 [16]) защиты ПО от непреднамеренных и преднамеренных изменений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 8.596-2002. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. Принят и введен в действие постановлением Госстандартом России от 30 сентября 2002г. №357-ст.
- [2] ГОСТ Р 8.839-2013. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Общие требования к измерительным приборам с программным управлением. Дата введения 2015-01-01.
- [3] ГОСТ 8.654-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения. Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 апреля 2015г. №308-ст.
- [4] Кожевников, А.Ю. Нерешенные проблемы аттестации программного обеспечения средств измерений и измерительных систем, возникшие в связи с изменением нормативной базы / А.Ю. Кожевников, А.И. Юрин // Мир измерений. – 2016. - №3. С.34-37.
- [5] Слаев, В.А. Аттестация программного обеспечения, используемого в метрологии: справочная книга / В.А. Слаев, А.Г.; под ред. В.А. Слаев. -СПб.: НПО «Профессионал», 2009, 320 с.
- [6] Столы поворотные цифровые СПЦ-383. Описание типа средств измерения – <http://www.fundmetrology.ru/>
- [7] Калдымов, Н.А. Исследование точностных характеристик прецизионного полноповоротного углозадающего стола для испытаний элементов инерциальных приборов. Алгоритмы управления автоматическим приводом, обеспечивающие повышение точности задания угловых положений / Н.А. Калдымов, А.В. Полушкин, С.Ф. Нахов, Р.В. Ермаков, И.В. Слестин,

- С.Н. Шацков // 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. – С.169-178.
- [8] 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.
- [9] 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 между-народным участием «Новые технологии, материалы и оборудование российской авиа-космической отрасли». –Изд.: Академии наук Республики Татарстан, Том 2, 2016. – С. 182-195.
- [10] Полушкин, А.В. Методы и средства для оценки технических характеристик звездных датчиков при наземных испытаниях / А.В. Полушкин, Н.А. Калдымов, Н.В. Дмитриев, С.Ф. Нахов, Р.В. Бессонов, Н.Н. Брысин, И.В. Полянский // XXIII МКИНС –СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Элек-троприбор», 2016. – С.401-406.
- [11] Дмитриев, Н.В. Определение инструменталь-ных погрешностей наземного гироскопа с помощью прецизионного поворотного стола / Н.В. Дмитриев, Р.В. Ермаков, А.В. Полушкин, С.Ф. Нахов // XXII МКИНС –СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – С.407-412.
- [12] Полушкин, А.В. Алгоритмы, методика и практические результаты автоматизации про-верки качества изготовления прецизионных маятниковых измерителей линейного ускорения / А.В. Полушкин, Р.В. Ермаков, Н.А. Калдымов, С.Ф. Нахов, А.В. Воронков, Р.А. Подругин, С.Ю. Виноградов // XXI МКИНС –СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. – С.163-170.
- [13] Васильев, В.Ф. Современное состояние индукционных датчиков угла. Анализ путей развития / В.Ф. Васильев, Д.Г. Борчанинов // XVI Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». –СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015.
- [14] Глаголев, И.П. Двухканальный прецизионный преобразова-тель угла с автономной калибровкой и коррекцией погрешности / И.П. Глаголев, Ю.П. Дорохин, Е.Л. Межеричский // Труды ФГУП «НПЦ АП» №2(8) –М.: ФГУП «НПЦ АП», 2009. – С.20-27, ISSN 1991-5950.
- [15] Ленский, Ю.В. Разработка прецизионного автоматизированного комплекса для проверки высокоточных преобразователей угла систем управления ракетно-космической техники / Ю.В. Ленский, А.С. Максаев, Р.М. Юмагузин // Труды VII научно-технической конференции молодых учёных и специалистов «Приборы и системы управления ракетно-космических комплексов» –М.:ФГУП «НПЦАП», 2016. – С.556-565, ISSN 978-5-9902269-6-8.
- [16] МИ 3286-2010 «Рекомендация. Проверка защиты программного обеспечения и опре-деление ее уровня при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа».

Угловое согласование трехкомпонентных магнитометров

А. А. Затеев
СПбГТИ(ТУ)
г. Санкт-Петербург, Россия

В. Г. Семенов
АО «МЕРА»
г. Санкт-Петербург, Россия
mail@mera.spb.ru

Аннотация — Разработан ряд методов углового согласования трехкомпонентных магнитометров и проведен анализ их погрешностей.

Ключевые слова — магнитная индукция; дифференциальный магнитометр; мера магнитного момента; угловое согласование

1. ВВЕДЕНИЕ

В морской магнитометрии применяются группы трехкомпонентных магнитометров, включенных по дифференциальной (разностной) схеме относительно опорного (компенсационного) магнитометра, главным образом, для компенсации вариаций магнитного поля Земли (МПЗ). Например, в проходных стендах для измерений магнитных полей кораблей (МПК) [1] (см. рис. 1) или в переносных системах магнитного поиска скрытых ферромагнитных объектов [2] (см. рис. 6). В таких стендах и системах показания всех магнитометров должны приводиться к системе координат опорного магнитометра.

Среди специалистов проблема углового согласования (УС) трехкомпонентных магнитометров традиционно считается трудноразрешимой, что неоднократно подчеркивалось в публикациях. Например,

- наименьшая погрешность установки датчиков на стенде водолазом по компасу составляет $\pm 5^\circ$, тогда как требуемое УС датчика с опорной системой координат должно быть не хуже $35''$ [1]¹.
- стоимость геодезических и подводных работ по ориентации каждого трехкомпонентного датчика при установке на его штатном месте, составляет значительную часть стоимости затрат за весь срок службы магнитоизмерительного стенда 2-го поколения [3].

Классификация и характеристики проходных стендов трех поколений приведены в обзоре [4]. Особенность стендов 1-го поколения (1950 ~ 70 гг.) заключается в применении множества однокомпонентных магнитометров, оси которых сами собой ориентируются вдоль вертикали под действием силы тяжести с помощью кардановых подвесов.

¹ В магнитном поиске [2] требования к УС еще жестче.

Стенды 2-го поколения (с 1970 г.) используют 12-18 трехкомпонентных магнитометров, которые нуждаются в УС.

В период 1980-90 гг. усиленно рекламировался стенд 3-го поколения MS90, использующий всего 2, в особых случаях 4 трехкомпонентных магнитометра. Многочисленные публикации и рекламные листки подчеркивали преимущества MS90, но не показали (достаточно ясно и убедительно), как осуществить для него УС. После 1990 г. поток публикаций по MS90 по неизвестным для нас причинам прекратился.

Итак, проблема УС для стендов 2 и 3 поколения приобретает особую актуальность, так как угловая несогласованность датчиков является плохо контролируемым источником погрешности групповых и дифференциальных магнитометров.

Здесь уместно отметить, что для одинарных трехкомпонентных магнитометров разработан универсальный, простой и дешевый метод резкого повышения точности измерений [5] через коррекцию в собственной ортогональной системе координат (СОСК²) магнитометра, построенной по измеренным неортогональностям его осей. В этой связи метод [5] обеспечивает также удобные и точные измерения неортогональностей магнитометра.

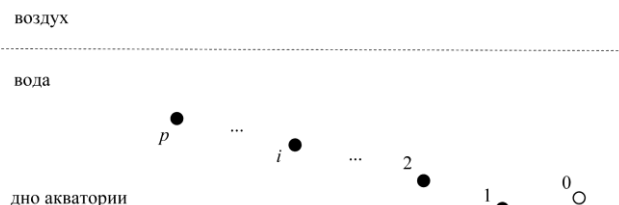


Рис. 1. Схема проходного стенда на трехкомпонентных датчиках магнитной индукции. $i = 1, 2, \dots, p$ – измерительный датчик; 0 – опорный (компенсационный) датчик.

Результаты [5] в части ортогонализации позволяют применить аппарат ортогональных матриц к задаче УС магнитометров и к организации их поверки. Особенность такой поверки состоит в том, что она должна быть *безде-*

² Само понятие СОСК магнитометра введено ранее в работе [6]. Оно применимо также к трехкомпонентным мерам магнитной индукции и магнитного момента (ММ).

монтажной. В противном случае поверка теряет смысл из-за появления новых угловых погрешностей при монтаже магнитометров после поверки.

II. УРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ РАЗНОСТИ МАГНИТНЫХ ИНДУКЦИЙ

В работе [5] результат измерений трехкомпонентным магнитометром представлен как искажение действительного значения вектора магнитной индукции некоторой 3×3 матрицей, называемой искажающей:

$$B_{ni} - O_i = u_i \cdot B_i = u_i \cdot s_{i0} \cdot B_0, \quad (1)$$

где $B_{ni} - O_i$ – вектор-столбец результата измерений i -го магнитометра, исправленный на его уходы нулей O_i ; u_i – искажающая матрица i -го магнитометра в его СОСК $_i$; B_i – вектор-столбец действительного значения магнитной индукции в СОСК $_i$; s_{i0} – матрица ортогонального преобразования координат из СОСК $_0$ в СОСК $_i$; СОСК $_0$ – опорного (компенсационного) магнитометра; B_0 – вектор-столбец действительного значения магнитной индукции в точке i в СОСК $_0$.

Если (заранее) определить искажающую матрицу i -го магнитометра u_i , а также матрицу s_{i0} , то последующие результаты измерений (1) можно просто и быстро корректировать либо в СОСК $_i$, либо в СОСК $_0$:

$$u_i^{-1} \cdot (B_{ni} - O_i) = B_i; \quad s_{0i} \cdot u_i^{-1} \cdot (B_{ni} - O_i) = B_0, \quad (2)$$

где u_i^{-1} – обратная искажающей или корректирующая матрица i -го магнитометра; s_{0i} – транспонированная матрица УС s_{i0} .

Как уже отмечалось, на магнитных стендах измеряют разности магнитной индукции между каждым измерительным и опорным (компенсационным) магнитометром, чтобы исключить влияние МПЗ, и прежде всего вариаций МПЗ, на результаты измерений МПК. Учитывая обозначения (2), составим типовое скорректированное уравнение измерений разности МПК между измерительным i и компенсационным 0 трехкомпонентными датчиками:

$$B_{i0} = s_{0i} \cdot u_i^{-1} \cdot \underbrace{(B^{МПК} + B^{МПЗ} - O)_{in}}_{B_i} - \underbrace{u_0^{-1} \cdot (B^{МПК} + B^{МПЗ} - O)_{0in}}_{B_0}, \quad (3)$$

где B_{i0} – скорректированная в СОСК $_0$ разность МПК между точками $i, 0$;

$(\dots)_{in}, (\dots)_{0in}$ – результаты измерений магнитометрами i и 0;

$B_{in}^{МПК}, B_{0in}^{МПК}$ – доли результатов измерений, относящихся к МПК; $B_i^{МПЗ}, B_0^{МПЗ}$ – МПЗ; O_{in}, O_{0in} – уходы нулей;

B_i, B_0 – скорректированные результаты соответственно в СОСК $_i$ и СОСК $_0$.

В уравнении (3) коррекцию выполняют корректирующие матрицы магнитометров и ортогональная матрица

s_{0i} , которая осуществляет согласование СОСК $_i$ и СОСК $_0$. Для этих матриц справедливы (доказательство опустим) следующие последовательности (см. также рис. 1):

$$\begin{aligned} s_{01}, s_{02} &= s_{01}s_{12}, \dots, s_{0i} = s_{01}s_{12}s_{23}\dots s_{i-1,i}, \quad s_{*i} = s_{*0}s_{0i} \\ s_{10}, s_{20} &= s_{21}s_{10}, \dots, s_{i0} = s_{i,i-1}\dots s_{32}s_{21}s_{10}, \quad s_{i*} = s_{i0}s_{0*} \end{aligned} \quad (4)$$

где s_{*0}, s_{0*} – матрицы, преобразующие соответственно СОСК $_0$ в какую-то другую опорную систему координат, например, географическую, или наоборот.

Корректирующие матрицы и уходы нулей определяются до установки магнитометров на штатных местах по методу [5]. Разумеется, матрицу s_{0i} следует определять после установки. Как следует из уравнения (3), определение матрицы завершает решение задачи УС дифференциального магнитометра. Далее мы рассмотрим некоторые методы УС магнитометров и сравним их погрешности.

III. АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД УГЛОВОГО СОГЛАСОВАНИЯ [7]

В работе [7] описан метод УС пары датчиков с помощью переносной меры магнитного момента (ММ) для аналитического определения неизвестных радиус-векторов (см. рис. 2) и матриц ортогонального преобразования координат между СОСК меры ММ и СОСК каждого датчика.

Обозначим следующие соотношения:

$$\tilde{B}_i = s \cdot \tilde{B}_i, \quad \tilde{M}_i = s \cdot \tilde{M}_i, \quad (5)$$

где $\tilde{B}_i, \tilde{B}_i$ – векторы магнитной индукции (три числа) соответственно в СОСК магнитометра (одна волнистая линия) и СОСК меры (две волнистые линии);

s – матрица ортогонального преобразования координат из СОСК меры в СОСК магнитометра;

$\tilde{M}_i, \tilde{M}_i$ – ММ, воспроизводимый i -той компонентой меры ММ.

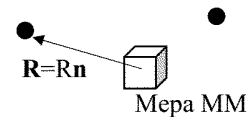


Рис. 2. К методам [7] и 7^м. $R=Rn$ – радиус-вектор между центрами датчика и меры ММ, R – модуль, n – единичное направление.

Как показано в [8], для дипольного ММ в СИ справедливо следующее соотношение:

$$\tilde{B}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \tilde{A} \cdot s \cdot \tilde{M}_i, \quad (6)$$

где $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн} / \text{м}$ – магнитная постоянная;

$\tilde{A} = \nabla \nabla \frac{1}{R} = \frac{3 \cdot \tilde{n} \cdot \tilde{n}' - I}{R^3}$ – координатная (симметричная)
3×3 матрица;

$\nabla \nabla \frac{1}{R}$ – градиент градиента обратного расстояния R ;

$R\tilde{n}$ – радиус-вектор между центрами меры и магнитометра (см. рис.2);

$\tilde{n}$ – матрица-столбец единичного направления радиус-вектора;

$\tilde{n}'$ – матрица-строка того же направления;

' – символ транспонирования.

В соотношении (6) искомыми неизвестными являются радиус-вектор $R\tilde{n}$ (или вся координатная матрица $\tilde{A}$) и матрица s .

Повторяя операцию (6) с каждой компонентой меры ММ, запишем:

$$\underbrace{(\tilde{B}_1 \quad \tilde{B}_2 \quad \tilde{B}_3)}_{\tilde{B}} = 10^{-7} \cdot \tilde{A} \cdot s \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} \tilde{M}_1 & \tilde{M}_2 & \tilde{M}_3 \end{pmatrix}}_{\tilde{M}}, \quad (7)$$

или в краткой форме:

$$\tilde{B} = 10^{-7} \cdot \tilde{A} \cdot s \cdot \tilde{M}, \quad (7a)$$

где $\tilde{B}$, $\tilde{M}$ – квадратные 3×3 матрицы.

Из (7a) можно определить произведение искомым неизвестных:

$$C = \tilde{A} \cdot s = 10^7 \cdot \tilde{B} \cdot \tilde{M}^{-1}, \quad (8)$$

где $^{-1}$ – символ обратной матрицы.

Далее освободимся от одного из неизвестных (s):

$$K = C \cdot C_T = \tilde{A} \cdot s \cdot s_T \cdot \tilde{A}_T = \tilde{A} \cdot \tilde{A} = \frac{3 \cdot \tilde{n} \cdot \tilde{n}' + I}{R^6}, \quad (9)$$

где $s \cdot s' = I$ равно единичной матрице, поскольку для ортогональной матрицы $s' = s^{-1}$. След матрицы (9) $K_{ii} = K_{11} + K_{22} + K_{33} = 6/R^6$ определяет искомое расстояние:

$$R = \left(\frac{6}{K_{ii}} \right)^{\%}, \quad (10)$$

а также произведение направлений:

$$\tilde{n} \cdot \tilde{n}' = \frac{K}{2K_{ii}} - \frac{1}{3} \cdot I. \quad (11)$$

Последнее определяет искомое единичное направление (с точностью до знака). Итак, соотношения (10) и (11) определяют искомый радиус-вектор $R\tilde{n}$ (или всю координатную матрицу $\tilde{A}$). Затем из соотношений (6)-(11) определяется искомая матрица ортогонального преобразования координат:

$$s = \tilde{A}^{-1} \cdot C = \tilde{M} \cdot \tilde{M}^{-1}. \quad (12)$$

Соотношения (6)-(12) выражают суть метода [7].

В заключение добавим решение относительно ММ диполя, полученное, по-видимому, впервые в [8]:

$$\tilde{M} = \frac{4\pi R^3}{\mu_0} \cdot \frac{3\tilde{n} \cdot \tilde{n}' - 2 \cdot I}{2} \cdot \tilde{B}, \quad (13)$$

которое до сих пор остается малоизвестным.

IV. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ (СЛУЧАЙНЫЕ) ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДА [7]

Для метода [7] можно получить аналитические выражения для норм СКО погрешностей для радиус-вектора и матрицы s:

$$\sigma_R = \frac{4\pi R^4 \sigma_B}{\mu_0 M} \times 0.36, \quad (14)$$

где σ_B – СКО шумов датчика и внешних помех, M – модуль воспроизводимого мерой ММ;

$$\sigma_s = \frac{4\pi R^3 \sigma_B}{\mu_0 M} \times (1.23 \div 1.5), \quad (15)$$

где коэффициент 1.23, если направление $\mathbf{n}$ (см. рис.2) совпадает с одной из осей меры ММ, и 1.5, если $\mathbf{n}$ равноудалено от её осей.

Обратим внимание, что σ_R пропорционально 4 степени расстояния, то есть метод [7] ограничен по расстоянию сверху. Однако, он ограничен и по расстоянию снизу, как будет показано в следующем разделе.

Рассчитаем также с помощью (13) норму СКО погрешностей измерений ММ (диполя) от шумов датчика и внешних помех:

$$\sigma_M = \frac{4\pi R^3 \sigma_B}{\mu_0} \times \frac{3}{2}. \quad (16)$$

V. ПОГРЕШНОСТИ И МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА [7]

Ограничения метода [7] при малых расстояниях связаны с тем, что метод составлен для идеальной модели то-

чечного диполя. С уменьшением расстояния мера ММ при её значительных габаритах перестает выглядеть точечным диполем. Модификация метода [7], обозначаемая далее как метод 7^m , направлена на устранение этого ограничения.

Пусть компоненты меры ММ выполнены в виде плоских витков. На рис. 3 изображена в качестве примера компонента x . Согласно модели Ампера, весь ММ такого витка с током может быть представлен суммой ММ участков, пропорциональных площади каждого участка. Для примера рассмотрим квадратный виток, разделенный на 9 участков $j = 1 \div 9$, как показано на рис. 3. Запишем по аналогии с соотношением (6) магнитные индукции от всех 9 участков во внешней по отношению к витку области:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\nabla \nabla \frac{1}{r_1} + \dots + \nabla \nabla \frac{1}{r_9} \right) \cdot \frac{\mathbf{M}}{9} = \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \nabla \left(\frac{1}{R_{cp}} \right) \cdot \mathbf{M}, \quad (17)$$

где $\frac{1}{R_{cp}} = \left(\frac{1}{r_1} + \dots + \frac{1}{r_9} \right) / 9$; $\mathbf{M} = I \cdot \mathbf{s}$ – ММ витка с током I ; $\mathbf{s}$ – вектор площади витка; $s = L^2$; L – длина ребра витка.

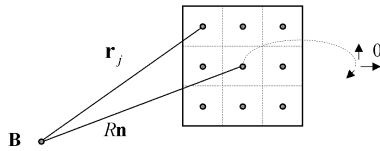


Рис. 3. Схема разделения витка меры ММ на участки

Модификация заключается в замене дипольного уравнения метода [7]

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\nabla \nabla \frac{1}{r_5} \right) \cdot \mathbf{M} \quad (17a)$$

на соотношение (17).

А. Методические погрешности в методах [7] и 7^m

Запишем из (17a) и (17) методические погрешности воспроизведения ММ мерой по методам [7] и 7^m соответственно как

$$\Delta \mathbf{M} = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\nabla \nabla \frac{1}{r_5} \right)^{-1} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{M}, \quad (18)$$

$$\Delta \mathbf{M}^m = \frac{4\pi}{\mu_0} \left(\nabla \nabla \frac{1}{R_{cp}} \right)^{-1} \cdot \mathbf{B} - \mathbf{M} \quad (19)$$

и рассчитаем их относительные оценки $|\Delta \mathbf{M}|/|\mathbf{M}|$ и $|\Delta \mathbf{M}^m|/|\mathbf{M}|$, например, при $R = 1,2,3,4$ м, $L = 1$ м, $\mathbf{M} = 10 \cdot (1;0;0)$ Ам². Результат представлен в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует, что метод 7^m значительно снижает методическую погрешность, присущую методу [7]. Разумеется, если число участков взять более 9 (см. рис. 3), например 16 или 25, то снижение методической погрешности будет еще более заметным.

ТАБЛИЦА 1. Относительные методические погрешности

	Расстояние R (м)			
	1	2	3	4
при $\mathbf{n} = (1 \ 0 \ 0)$				
$ \Delta \mathbf{M} / \mathbf{M} $ для [7]	3.3×10^{-1}	1.0×10^{-1}	4.8×10^{-2}	2.7×10^{-2}
$ \Delta \mathbf{M}^m / \mathbf{M} $ для 7^m	5.5×10^{-3}	1.4×10^{-3}	6.1×10^{-4}	3.4×10^{-4}
при $\mathbf{n} = (0 \ 1 \ 0)$ или $(0 \ 0 \ 1)$				
$ \Delta \mathbf{M} / \mathbf{M} $ для [7]	3.5×10^{-1}	8.4×10^{-2}	3.7×10^{-2}	2.1×10^{-2}
$ \Delta \mathbf{M}^m / \mathbf{M} $ для 7^m	4.1×10^{-3}	1.0×10^{-3}	4.6×10^{-4}	2.6×10^{-4}

В. Инструментальные случайные погрешности в методах [7] и 7^m

Для метода 7^m оценки погрешностей, аналогичные (15), получены численно с помощью компьютерного моделирования (КМ) процесса поиска матрицы s с погрешностями, добавляя по всем компонентам датчика нормально распределенные вариации с нулевым средним и СКО $\sigma_B = 10^{-9}$ Тл, повторяя поиск $p = 100$ раз, составляя ряд результатов поиска, по которому вычисляется норма СКО погрешностей σ_s и оценка всей погрешности среднего

$$d_s = 3\sigma_s / \sqrt{p} + m_s, \quad (20)$$

где m_s – норма погрешности среднего. В качестве примера итоговые результаты приведены ниже в функции R при $M = 10$ Ам² и направлении $\mathbf{n}$, равноудаленном от всех осей меры.

Как видно из табл. 2, с повышением расстояния аналитические оценки СКО (15) почти совпадают с КМ-оценками метода 7^m , которые также растут в 3 степени расстояния.

Итак, на больших расстояниях метод 7^m также ограничен по точности как метод [7], но на малых расстояниях он лучше [7] за счет значительного снижения методических погрешностей (см. табл. 1).

VI. МЕТОД УГЛОВОГО СОГЛАСОВАНИЯ [9]

Как следует из табл. 2, для метода 7^m диапазон расстояний между мерой и каждым датчиком не должен превышать ~2.5 м. В задаче измерений дальнего МПК [10] расстояние между измерительным и компенсационным датчиками может быть 50 м и больше. В этом случае следует применить метод [9], погрешности которого не зависят от

расстояний между согласуемыми датчиками. Рассмотрим его подробнее.

ТАБЛИЦА 2. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДОВ [7] И 7^м

		Расстояние R (м)			
		1	1.5	2	2.5
$\sigma_s(15), [7]$		1.5×10^{-3}	5×10^{-3}	1.2×10^{-2}	2.3×10^{-2}
7 ^м , КМ	σ_s	2.4×10^{-3}	5.5×10^{-3}	1.3×10^{-2}	2.3×10^{-2}
	m_s	1.0×10^{-4}	2×10^{-4}	3×10^{-4}	2×10^{-4}
	d_s	7.8×10^{-4}	1.9×10^{-3}	4.1×10^{-3}	7.1×10^{-3}

Предположим, что зона измерений достаточно удалена от источников неоднородных помех. Тогда МПЗ в этой зоне можно считать однородным, и при удаленном корабле получим из уравнения измерений (3) уравнение вида

$$s_{0i} \cdot B_i = B_0 \text{ или } s_{i0} \cdot B_0 = B_i, \quad (21)$$

где $s_{0i} = s_{i0}^{-1} = s'_{i0}$ – искомая ортогональная матрица, верхний индекс -1 – символ обратной матрицы, верхний индекс ' – символ транспонированной матрицы. То есть, как уже отмечалось, для ортогональной матрицы ее обратная матрица равна транспонированной.

Ортогональную матрицу s_{0i} (или s_{i0}) можно представить в виде произведения матриц последовательных поворотов системы координат на некоторые углы t_1, t_2, t_3 вокруг соответствующих ортов. Запишем матрицу s_{i0} , например, так:

$$s_{i0} = \begin{pmatrix} \cos t_3 & -\sin t_3 & 0 \\ \sin t_3 & \cos t_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos t_2 & 0 & \sin t_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin t_2 & 0 & \cos t_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos t_1 & -\sin t_1 \\ 0 & \sin t_1 & \cos t_1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Как видно из (22), уравнение (21) представляет собой систему трех (нелинейных) уравнений относительно трех неизвестных t_1, t_2, t_3 .

Для численного решения нелинейных систем в пакете MATLAB предусмотрены подпрограммы *fsolve* и *lsqnonlin*, которые требуют задания начальной комбинации неизвестных $x_0 = (t_1 \ t_2 \ t_3)_0$. Однако *fsolve* для уравнения (21+22) дает неоднозначные решения, зависящие от выбора x_0 . Для устранения неоднозначности применим *lsqnonlin* и видоизменим уравнение (21+22):

$$s_{i0} C_0 = C_i, \quad (23)$$

где $C_0 = (B_1 \ B_2 \ \dots \ B_p)_0$, $C_i = (B_1 \ B_2 \ \dots \ B_p)_i$ – $3 \times p$ -матрицы из (синхронных) отсчетов МПЗ опорного и измерительного магнитометров, скорректированных в соответствующих СОСК, $p \geq 3$.

Уравнение (23) выражает основное содержание метода [9]. С помощью КМ (23) рассчитаем углы χ и погрешности УС d_s (см.(20)) для метода [9] в зависимости от СКО вариаций МПЗ σ_b и СКО шумов датчиков σ_d . Точные углы $\chi = (0.030 \ -0.040 \ 0.045)$. Результаты КМ представлены в табл. 3. Обратим внимание, что погрешности УС для метода [9] снижаются вместе с уровнем СКО шумов датчиков, но повышаются со снижением СКО вариаций МПЗ.

Здесь уместно отметить, что в литературе ранее был описан несколько похожий метод компенсации вариаций МПЗ трехкомпонентного магнитометра с опорой на вариационную станцию [11].

ТАБЛИЦА 3. ПОГРЕШНОСТИ УС МЕТОДОМ [9]

	СКО вариаций и СКО шумов датчиков, σ_b / σ_d (нТл)		
σ_b / σ_d (нТл)	1 / 0	1 / 0.05	1 / 0.1
$\chi = (t_1 \ t_2 \ t_3)$	0.0294 -0.0400 0.0435	0.0259 -0.0402 0.0350	0.0236 -0.0403 0.0294
Погрешность УС, d_s	1.8×10^{-3}	1.3×10^{-2}	1.9×10^{-2}
σ_b / σ_d (нТл)	3 / 0	3 / 0.05	3 / 0.1
$\chi = (t_1 \ t_2 \ t_3)$	0.0300 -0.0400 0.0449	0.0286 -0.0401 0.0417	0.0269 -0.0401 0.0375
Погрешность УС, d_s	1.2×10^{-4}	4.6×10^{-3}	1.0×10^{-2}
σ_b / σ_d (нТл)	10 / 0	10 / 0.05	10 / 0.1
$\chi = (t_1 \ t_2 \ t_3)$	0.0300 -0.0400 0.0450	0.0299 -0.0400 0.0447	0.0294 -0.0400 0.0435
Погрешность УС, d_s	4.0×10^{-6}	8.0×10^{-4}	2.3×10^{-3}

Одно из отличий метода [9] состоит, как уже отмечалось, в предварительной *ортогонализации* и коррекции магнитометров в соответствующих СОСК по методу [5] и в поиске согласующей *ортогональной* матрицы через определение её трех угловых аргументов.

VII. МЕТОД УГЛОВОГО СОГЛАСОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ПЕРЕНОСНЫХ СИСТЕМ МАГНИТНОГО ПОИСКА

Предположим, что система магнитного поиска [2], схематически изображенная на рис. 4, находится вдали от объекта поиска в однородном МПЗ. Тогда по аналогии с выражением (23) запишем соотношение

$$(B' \ B'' \ B''')_i = s_{i0} \cdot (B' \ B'' \ B''')_0, \quad (24)$$

где B'_i, B''_0 – синхронные, скорректированные в соответствующей СОСК результаты измерений МПЗ при вспомогательном повороте или наклоне всей системы вокруг её

координатной оси X на некоторый угол; B''_i, B''_0 – то же самое вокруг оси Y ; B'''_i, B'''_0 – то же самое вокруг оси Z .

Если угол поворота будет достаточно большим, то вектор-столбцы матрицы 3×3 в правой части будут некопланарны. Тогда для неё существует обратная матрица, что определяет искомую матрицу УС

$$s_{i0} = (B' \ B'' \ B''')_i \cdot (B' \ B'' \ B''')_0^{-1}. \quad (25)$$

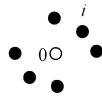


Рис. 4. Схема переносной системы магнитного поиска на трехкомпонентных датчиках МИ на жесткой базе

В качестве примера определим погрешности УС методом (25) в зависимости от угла поворота α с помощью КМ погрешностей УС при СКО вариаций МПЗ 1.0 нТл и СКО шумов датчиков 0.1 нТл для одной пары датчиков. Итоговые результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4. Инструментальные погрешности метода (25)

	Угол α (°)					
	1	3	10	30	45	90
d_s , КМ	1.3×10^{-3}	4.4×10^{-4}	1.3×10^{-4}	4.3×10^{-5}	3.2×10^{-5}	3.0×10^{-5}

Итак, данные таблицы показывают, что метод (25) достаточно эффективен, несмотря на свою простоту.

VIII. СРАВНЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫШЕРАССМОТРЕННЫХ МЕТОДОВ УГЛОВОГО СОГЛАСОВАНИЯ

Выше, в табл. 2-5 приведены оценки погрешностей d_s для предлагаемых методов УС. Сопоставим эти оценки выборочно. Для метода 7^м выберем оценку при расстоянии 2.5 м, для метода [9] – при СКО 3 и 0.05 нТл, для метода (24) – при углах поворота $\sim 10^\circ$. Добавим к ним соответствующие d_s оценки начальных (5°) и допустимых (35°) углов рассогласования по работе [1] (см. также раздел 1) и соответствующие этим углам различия в результатах измерений МПЗ $\Delta = |B_i - B_0| / |B_0|$.

Таблица 5. Сравнение погрешностей при УС (d_s) и без УС (Δ)

	Метод УС		
	7 ^м	[9]	(25)
d_s	7.1×10^{-3}	4.6×10^{-3}	1.3×10^{-5}
$ 35' \times \sqrt{3}$	1.8×10^{-2}		
$ 5^\circ \times \sqrt{3}$	1.5×10^{-1}		
$\Delta(35^\circ)$	1.1×10^{-2}		
$\Delta(5^\circ)$	9.6×10^{-2}		

IX. Выводы

В системах морской магнитометрии применяются множества трехкомпонентных магнитометров, УС которых нуждается в наладке, периодическом контроле и совершенствовании.

На основе предварительной ортогонализации и коррекции трехкомпонентных магнитометров [5] предложен ряд неконтактных методов УС, которые по точности удовлетворяют требованиям [1] (см. табл. 5):

- метод 7^м (см. рис. 2, 3 и разделы 3-5) предназначен для работы в труднодоступных местах, например на дне акватории, если предельное расстояние между мерой ММ и согласуемыми (или проверяемыми) датчиками не превышает 2.5-3 м;
- метод [9] универсален, так как его погрешности практически не зависят от расстояния между измерительным и опорным (компенсационным) датчиками. По нашему мнению, для этого метода имеются резервы повышения точности. После доработки метод [9] можно рекомендовать к применению в бортовых системах размагничивания, на проходных и модельных магнитных стендах, на стендах магнитной обработки, а также для контроля измерений в дальнем поле корабля;
- метод (25) сочетает простоту и высокую точность УС. Он предназначен для переносных систем магнитного поиска.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] B.J. Marshall. Operational Aspects of Magnetic Measurement Ranges. Naval Forces, 1989, vol. 10 #2, pp. 72-78.
- [2] Ю.М. Иванов, В.Г. Семенов. Сравнительный анализ методов поиска источников магнитного поля дипольной модели // Измерительная техника. – 2017. – №8. – С.49-54.
- [3] D.C. Matthews. Contemporary degaussing measuring ranges. Maritime Defence, 1979, vol. 4 #12, pp. 499-503.
- [4] More efficient degaussing at less cost. Maritime Defence, 1988, vol. 13 #7, pp. 251-52.

- [5] Ю.М. Иванов, В.Г. Семенов. Корректирующие матрицы – путь к повышению точности трехкомпонентных магнитометров // Измерительная техника. – 2013. – №6. – С.46-51.
- [6] Merrayo J.M.J. e.a. Scalar calibration of vector magnetometers // Meas. Sci. Technol., 2000, vol.11, pp. 120-132.
- [7] Патент РФ 2290657. Способ определения местоположения и ориентации трехкомпонентного датчика магнитометра относительно меры магнитного момента / Иванов Ю.М., Малышев О.В. и др.; патентообладатель АО «МЕРА». – № 2005125663/28 ; заявл. 09.08.2005 ; опубл. 27.12.2006, Бюл. № 36. – 10 с.
- [8] В.Г. Семенов. Решение обратной задачи для источника физического поля дипольной или квадрупольной модели // Методы и средства точных магнитных измерений / Сб. науч. трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева». – 1980. – С.3-19.
- [9] Патент РФ 2654073. Приоритет 060617. Способ калибровки трехкомпонентного магнитометра.
- [10] Р.В. Гетьман, А.А. Затеев и др. Анализ погрешностей измерений магнитного момента кораблей в дальнем поле // Морской вестник. – 2018. – №1. – С.102-104.
- [11] John J. Holmes. Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures. M&C, 2008.

Резонансный преобразователь энергии качки с обратной связью

А. П. Белянцев, Д. Г. Грязин
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация — Рассмотрены различные преобразователи энергии качки носителя в электрическую энергию. Предложен метод увеличения коэффициента полезного действия преобразователя энергии качки объекта на волнении, использующего схему обращённого линейного акселерометра, путём настройки его механической части в резонанс с частотой внешней возмущающей силы. В результате исследований произведена оценка основных характеристик преобразователя, а также вырабатываемая мощность в зависимости от параметров буя, качающегося на морском волнении.

Ключевые слова — преобразователь энергии; восполнение энергии; волновая электростанция; морские автономные аппараты; качка

I. ВВЕДЕНИЕ

В связи с развитием морской техники актуальной задачей стала разработка и исследование генераторов для возобновления энергии морских автономных аппаратов и буёв. Как правило, поверхностно плавающие морские автономные объекты используют солнечную и ветровую энергию, реже — энергию движения жидкости и волнение моря [1,2,3]. С целью подзарядки аккумуляторных батарей различных автономных аппаратов возможно использовать генераторы, использующие энергию колебаний объекта, на котором они установлены.

II. ОБЗОР ГЕНЕРАТОРОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КАЧКУ НОСИТЕЛЯ

В настоящее время существует несколько генераторов, преобразующих энергию колебаний в электрическую энергию. Все они состоят из следующих основных компонентов:

- инерционного тела — устройства, преобразующего колебания носителя в собственные колебания;
- энергетического преобразователя — устройства, преобразующего энергию колебаний инерционного тела в электрическую;
- преобразовательной, аккумулирующей, распределительной и крепёжной систем.

Классическим примером генератора, использующего колебания носителя является автоподзавод в механических часах, механизм которого представлен на рисунке 1. В наручных часах устанавливается эксцентрик, выполненный в форме сектора, центр тяжести которого смещен к краю. При любых движениях руки он поворачивается вокруг оси под действием инерции и сила тяжести и тем самым посредством фрикциона и системы шестерен заво-

дит пружину, которая является источником энергии механических часов.



Рис. 1. Часовой механизм с автоподзаводом

Достоинства подобного механизма заключаются в следующем:

- увеличение ресурса автономной работы устройства;
- увеличение точности работы часов.

Недостатки механизма автоподзавода:

- сложность изготовления, что сказывается и на конечной стоимости;
- повышение массы конструкции.

Другим примером преобразователя энергии качки носителя в электрическую энергию является портативный линейный генератор nPower PEG от компании Tremont Electric [4], который представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Портативный линейный генератор nPower PEG

Принцип работы указанного генератора основан на законе электромагнитной индукции. При движении человека, два генератора, конструкция которых включает пружины, груз и катушку преобразуют кинетическую энергию движения грузов в электрическую. Встроенная литиево-полимерная батарея ёмкостью 2000 мА·ч аккумулирует

ток от генераторов, а затем передаёт его устройству-потребителю. Выходная мощность преобразователя составляет порядка 4 Ватт, которой достаточно для подзарядки аккумуляторных батарей большинства образцов современной портативной потребительской электроники (телефонов, плееров и т.д.). Масса преобразователя составляет порядка 400 грамм, а линейные размеры: высота – 0,26 м; диаметр – 0,05 м.

В качестве вывода можно отметить то, что преобразователи, использующие энергию колебаний носителя, являются перспективной областью возобновляемой энергетики, однако конструкции генераторов являются неотработанными ввиду малого количества исследований и разработок в данной области.

III. РЕЗОНАНСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ МОРСКОГО ВОЛНЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Очевидно, что число физических явлений, которые можно использовать для выработки электрической энергии в условиях работы морских автономных аппаратов и буёв очень ограничено. Для подзарядки аккумуляторных батарей различных образцов морской техники может быть использована энергия от качки объекта, вызванной волнением. За основу подобного источника энергии может быть взят индукционный преобразователь, использующий линейное перемещение подвижной массы.

На рисунке 3 показан общий вид разрабатываемого преобразователя. При движении объекта с преобразователем на волнении, инерционное тело 1 (подвижная масса m), образованное цилиндрическими постоянными магнитами ротора и магнитоэлектрическими элементами (стальными пластинами), и имеющее упругий подвес в виде пружин 2 с коэффициентом жёсткости $c_{ж}$, совершает линейное возвратно-поступательное движение по направляющей. В трёхфазной обмотке генератора 3 вырабатывается переменное напряжение, пропорциональное скорости движения подвижной массы. Регулирование амплитуды переменного напряжения, поступающего с обмотки генератора 3 на вход аккумулятора 4, осуществляется с помо-

щью системы управления 5. С целью увеличения КПД преобразователя, механическая колебательная система настраивается в резонанс с преобладающей частотой волнения. Для этого система управления 5 осуществляет расчёт преобладающей частоты вертикальной качки объекта, на котором установлен преобразователь, и создаёт силу электромагнитного торможения подвижной массы 1 за счёт изменения протекающего тока в обмотке магнитоэлектрического элемента 6, что обеспечивает перенастройку частоты собственных колебаний механической системы преобразователя, необходимую для работы в резонансном режиме с преобладающей частотой вертикальной качки объекта.

Учитывая, что преобладающая частота колебаний будет изменяться в зависимости от интенсивности волнения, нужно изменять и собственную частоту системы. Указанное изменение может быть реализовано путём изменения степени успокоения системы ξ . Как известно [5], выражение для частоты собственных колебаний механической системы ω_c , 1/с, имеет вид:

$$\omega_c = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \xi^2}, \quad (1)$$

где: $\omega_0 = \sqrt{c_{ж} / m}$ – частота недемпфированных колебаний системы, 1/с; $c_{ж}$ – коэффициент жёсткости, Н/м; m

– масса инерционного тела, кг; $\xi = \frac{K_d}{2 \cdot \sqrt{c_{ж} \cdot m}}$ – степень успокоения системы; K_d – коэффициент демпфирования, кг/с.

Таким образом, перенастройка частоты собственных колебаний ω_c механической системы может быть достигнута за счёт изменения степени успокоения системы ξ или коэффициента демпфирования K_d .

Достоинства рассматриваемого преобразователя заключаются в следующем:

- 1) Возможность подстройки собственной частоты колебаний механической системы, что позволяет использовать преобразователь при меняющихся характеристиках волнения, тем самым увеличивая его КПД;
- 2) Более высокий КПД установки за счёт использования в конструкции электрогенератора статора с замкнутым магнитопроводом, вследствие чего уменьшаются потери энергии из-за рассеяния магнитного поля;
- 3) Преобразователь имеет малое число подвижных механических элементов, что увеличивает ресурс работы, надёжность и КПД;
- 4) Возможность масштабирования системы.

В результате расчёта, а также компьютерного моделирования электромеханической системы преобразователя были получены следующие предварительные результаты:

- 1) При увеличении массы инерционного тела возрастает диапазон степени успокоения системы ξ и тем сложнее управлять системой.
- 2) В электрической цепи преобразователя присутствует высокая реактивная составляющая. Вследствие этого

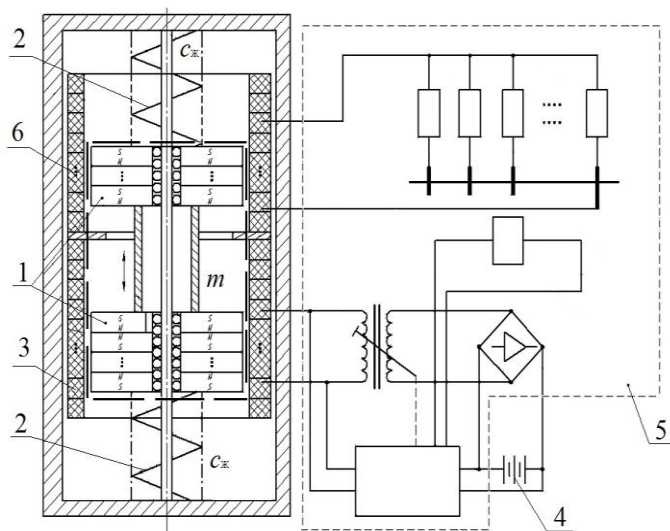


Рис. 3. Схема преобразователя энергии морского волнения.

происходит дополнительный нагрев обмоток преобразователя.

3) Построена характеристика зависимости выходной мощности генератора от амплитуды волн, которая представлена на рисунке 4.

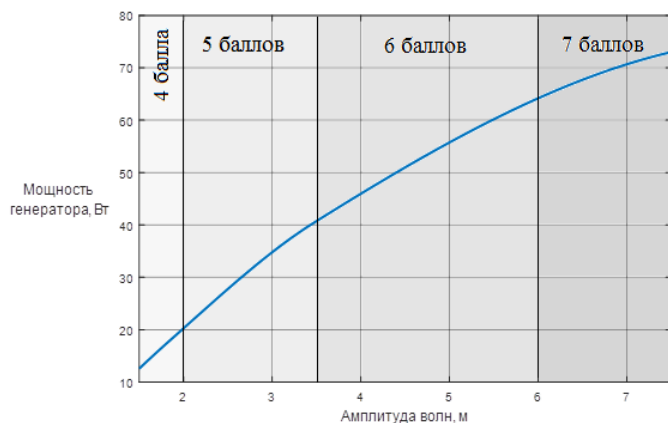


Рис. 4. Зависимость вырабатываемой мощности генератора от амплитуды волнения в случае установки генератора на поверхностно плавающий буй

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящей статьи были рассмотрены различные преобразователи энергии колебаний носителя в электрическую энергию. Предложена конструкция генератора, использующего схему обращённого линейного акселерометра который может быть использован для подзарядки аккумуляторных батарей различных автономных аппаратов, а также предложен метод увеличения коэффициента полезного действия указанного преобразователя, путём настройки его механической части в резонанс с частотой внешней возмущающей силы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Перспективные технологии преобразования возобновляемой энергии // [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-tehnologii-preobrazovaniya-vozobnovlyaemoy-energii> //
- [2] Обзор источников электрической энергии безэкипажных надводных аппаратов // [Электронный ресурс]: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-istochnikov-elektricheskoy-energii-bezekipazhnyh-nadvodnyh-apparatov> //
- [3] Патент РФ №2577924 // [Электронный ресурс]: www.freepatent.ru/patents/2577924 //
- [4] nPower PEG // [Электронный ресурс]: <http://npowerpeg.com/> //
- [5] Браславский Д. А. Приборы и датчики летательных аппаратов. М: Машиностроение, 1970. 391 с.

Использование технологий трехмерной печати для производства микромеханических датчиков

А. И. Скалон, А. А. Тыртычный
Кафедра высшей математики и механики
ГУАП
г. Санкт-Петербург, Россия
alekseyguap@mail.ru

Аннотация — В докладе рассматривается применение современных технологий высокотемпературной многослойной 3D-печати, в том числе печати металлом, для производства микромеханических датчиков для систем управления и навигации. Приведен краткий обзор технологий 3D-печати. Рассмотрены технологии, которые могут быть использованы для производства инерциальных датчиков, с учетом требований к размерам традиционных микромеханических устройств.

Ключевые слова — Микромеханика, МЭМС, автоколебания, акселерометр, гироскоп, инерциальный датчик, трехмерная печать.

I. МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

Микроминиатюрные электромеханические системы (МЭМС) стали доступны благодаря освоению технологии изготовления трехмерных механических структур с использованием технологий и оборудования, применяемого в микроэлектронике. Это новое направление в области приборостроения получило название микромеханики. Традиционно технология создания таких систем основана на различных методах добавления и удаления слоев некоторых материалов, нанесенных на кремниевую поверхность [1]. В результате получаются трехмерные структуры, элементы которых обладают степенями свободы друг относительно друга.

Работы по созданию микромеханических акселерометров (ММА) гироскопов (ММГ) начались в 1990-х гг. в ряде ведущих лабораторий и институтов зарубежных стран. В настоящее время несколько крупных зарубежных фирм серийно выпускают ММГ, например, Analog Devices, STMicroelectronics, Honeywell, Bosch, Silicon Sensing, Murata, Systron Donner и др [1]. В зарубежных странах ММГ широко используются в автомобильной промышленности, робототехнике, системах управления и навигации различных подвижных объектов (беспилотных летательных аппаратов, управляемых реактивных снарядов) и т.п.

Привлекательными качествами этих приборов, определившими их быстрое развитие, являются предельно малые габариты, высокая надежность и низкая стоимость, что достигается путем использования групповых технологий микроэлектроники, адаптированных к изготовлению микромеханических устройств. Чрезвычайно важным является также практически полная совместимость механи-

ческой части приборов с сервисной электроникой. Рынок МЭМС в последнее время характеризуется значительным ростом.

Согласно данным маркетинговых исследований, в настоящее время из МЭМС-датчиков наибольший интерес у заказчиков вызывают инерциальные датчики и системы. По данным аналитической компании Yole, наиболее востребованы разработки новых МЭМС-датчиков для военной и аэрокосмической областей, а ежегодный рост продаж составляет 9 %. По данным Yole, в будущем ожидается динамичное развитие промышленных и коммерческих применений МЭМС, рост продаж в данных отраслях составит 16,5% [2]. Еще более характерна данная ситуация для российского рынка, так как производство высокосерийных потребительских электронных устройств отсутствует.

Самые современные микроэлектромеханические датчики и инерциальные блоки от известных мировых производителей в Россию, как правило, не поступают ввиду наличия разного рода ограничений. Отечественные микроэлектромеханические датчики и инерциальные блоки во многих применениях не удовлетворяют предъявляемым к ним метрологическим требованиям. В связи с этим разработка принципиально новых датчиков и построенных на их основе инерциальных блоков становится чрезвычайно актуальной, но требует отказа от традиционных решений как в плане принципов построения, так и применения новой элементной базы.

Современная технология производства МЭМС обладает рядом недостатков. Наиболее существенными из которых является ее сложность и необходимость использовать дорогостоящее специализированное оборудование, в том числе использование дополнительных систем для поддержания определенных условий окружающей среды в так называемых «чистых» помещениях. Процесс производства, включающий в себя литографию, травление, осаждение и другие этапы, сложен и длителен. Кроме того, данная технология часто требует использования высоких температур, что приводит к невозможности использования многих современных материалов, особенно полимеров и пластмасс.

II. ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Относительная простота технологии трехмерной печати и ее бурное постоянное развитие: появление новых методов и материалов, - приводит к все более широкой

доступности 3D-печати. Эта технология все более активно используется в совершенно различных отраслях техники. Представляет интерес и ее применение для создания МЭМС.

Сегодня 3D-принтеры способны послойно «выращивать» заданный объект не только из различных полимеров и пластиков, но также и из других рабочих материалов: смол, целлюлозы, стекла, керамики и даже металла [3]. Однако требуется адаптация существующих технологий многослойной 3D-печати к области микромеханики, а именно изучение производства с их помощью инерционных масс инерциального блока.

А. Стереолитография (SLA)

Метод стереолитографии (SLA) основан на фотополимеризации жидкого фотополимера на платформе под воздействием лазерного луча. Модель создается путем последовательно полимеризующихся слоев. Первый слой фотополимера (50-150 мкм) полимеризуется лазерным лучом, затем платформа опускается на толщину слоя, и процесс повторяется до тех пор, пока не будет построена вся модель. Избыток полимера удаляется, и модель промывается. Дополнительные нежелательные химические реакции могут привести к изменению размеров модели и трещинам. Полученная поверхность имеет существенную шероховатость (от 50 мкм), которая затем может быть удалена в результате отдельного процесса шлифовки. [4]

В. Микростереолитография

Неудовлетворенность точностными характеристиками стереолитографии привела к появлению микростереолитографии [5]. Принцип её довольно схож со стереолитографией SLA, однако использование высокоточных оптических систем и стабилизированных платформ позволяет повысить разрешение печати до 2 мкм [6], что уже сопоставимо с традиционными технологиями производства МЭМС. Недостатком технологии является её высокая сложность, которая привела к практически полному отсутствию коммерческого применения на данный момент. В случае большей коммерциализации технологии она несомненно найдёт применение для производства МЭМС. Также в качестве недостатков технологии следует упомянуть возможную нестабильность размеров деталей, изготовленных из фоточувствительных смол, и даже их разрушение под воздействием видимого света, ультрафиолетового излучения, различных газовых и жидких сред [5].

С. Технология PolyJet

Технология PolyJet ещё одним вариантом стереолитографии, при ней фотополимер также наносится некой печатной головкой, а для его затвердения используется ультрафиолетовое излучение. Точностные характеристики метода сопоставимы с традиционными технологиями МЭМС (разрешение до 16 мкм). Однако температурная стабильность материалов, используемых в данном методе, как правило, ниже по сравнению с материалами других технологий 3D-печати. Стоит отметить, что пользователь технологии PolyJet может самостоятельно создать смесь предлагаемых производителем принтера материалов для достижения устраивающих его свойств материала трехмерной печати [4].

Д. Создание МЭМС

Можно обратить внимание, что требования по точности производства моделей при использовании технологий микростереолитографии, PolyJet и традиционной технологии МЭМС сопоставимы. Однако общей проблемой описанных методов трехмерной печати для использования их при производстве микромеханических инерциальных датчиков являются низкие механические характеристики материалов 3D-печати, что не позволяет использовать их для создания упругих элементов подвеса инерциальной массы.

В табл. 1 [4] приведены механические характеристики полимерных материалов 3D-печати, а также алюминия и кремния, основного материала современной технологии МЭМС.

ТАБЛИЦА 1. - МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Материал	Предел прочности, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа	Температура стеклования, °C
PC	68	2,3	161
PC-ISO	57	2,0	161
PC-ABS	41	1,9	125
ULTEM9085	72	2,2	185
PPSF	55	2,1	230
RGD5160-DM	55-60	2,600-3,000	50
RGD525	70-80	3,200-3,500	65
FullCure720	50-65	2,000-3,000	50
VeroClear FullCure810	50-65	2,000-3,000	53
VeroGray FullCure850	50-65	2,000-3,000	53
VeroBlue FullCure840	50-60	2,000-3,000	50
DurusWhite FullCure430	20-30	1,000-2,000	35
TangoBlackPlus	0.8-1.5	-	-
TangoBlack Full Cure970	1.8-2.4	-	-
TangoGray FullCure950	3-5	-	-
Кремний	7	190	1414
Алюминий	170	69	660

Материалы трехмерной печати, используемые для производства инерциальных микромеханических датчиков, должны обладать высокой прочностью и малой деформируемостью при изменении температуры. Большинство материалов, используемых для 3D-печати, являются диэлектриками, но существуют и технологии трехмерной печати металлом. Металлы не только имеют более высокие механические характеристики, но и необходимы в ряде МЭМС, требующих сочетания диэлектрических и проводящих частей конструкции.

III. ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛОМ

Широко признан тренд по всё более широкому использованию трёхмерных принтеров, печатающих металлом, от производства прототипов до массового производства [7]. В Италии уже есть фабрика, специализирующаяся на производстве комплектующих авиационных реактивных двигателей и использующая в своём производстве только трёхмерные принтеры, печатающие металлом [8]. В автомобильной промышленности 3D-печать используется для

изготовления кузовов и отдельных деталей двигателя, такие компании, как Toyota и Mercedes-Benz всерьез рассматривают использование технологии 3D-печати металлом в серийном производстве [8].

Несмотря на то, что научные работы с первыми идеями производства МЭМС с помощью 3D-печати металлом, начали появляться ещё довольно давно [9], создание отдельных элементов микромеханических датчиков, в том числе и самого чувствительного элемента, из металла прямо в процессе 3D-печати до сих пор выглядит крайне перспективно.

Речь о снижении стоимости и повышении качества продукции трёхмерных принтеров, печатающих металлом, идёт уже давно. Так студенты Мичиганского технологического института, добавив в конструкцию трёхмерного принтера сварочный аппарат, создали печатающий металлом принтер, себестоимость которого была существенно дешевле существующих на тот момент промышленных образцов [10]. Сварочный аппарат оплаивал металлическую проволоку, капли металла наносились на платформу послойно подобно описанным ранее технологиям. Естественно, качество поверхности и точность изготовления малых элементов конструкции в данном случае была невысокой.

Во время трёхмерной печати металлические материалы подвергаются сложной термической обработке, включающей плавление и быстрое затвердевание. Эти факторы вносят сложности в анализ изменения микроструктуры материала и его свойств, однако ряд современных научных работ [11] признают возможность достичь при трёхмерной печати металлом механических свойств объекта сопоставимых с металлическим объектом, произведенным традиционными методами, так как достигаемые при трёхмерной печати относительно высокие скорости охлаждения уменьшают размеры образующихся зерен и повышают механические характеристики [11].

Металлы широко используются и в существующих сегодня конструкциях инерциальных микроэлектромеханических датчиков, однако не являются основным материалом чувствительного элемента. На текущем уровне развития науки затруднительно установить, какой конкретно материал, содержащий металл наиболее всего соответствует указанным ранее критериям. Эта задача требует дальнейших длительных исследований, которые широко проводятся. Постоянно появляются научные работы, посвященные как новым методам 3D-печати металлом, так и выбору печатного материала, например, [12].

Ряд высокопрочных сплавов, таких как алюминиевые, считались недоступными для 3D-печати, так как при кристаллизации расплава в них начнут образовываться продолговатые или дендритные зерна, а оставшийся между ними расплав при дальнейшем охлаждении затвердеет и уменьшится в объеме, из-за чего в материале образуются полости и трещины. Для того чтобы избежать образования такой структуры, частицы порошка из алюминиевого сплава можно покрыть другими наночастицами, например, гидридом циркония, который при плавлении образует фазу Al_3Zr . Множество этих наночастиц на поверхности частиц порошка служат центрами кристаллизации, которые обеспечивают образование мелких

равноосных зерен и отсутствие трещин и полостей в конечном материале [13].

Помимо того, что металлы хорошо удовлетворяют указанным ранее критериям выбора материала, технология трёхмерной печати позволит существенно снизить трудозатраты на подготовку производства, а также постпроцессинг, и общую стоимость производства микромеханического датчика, конструкция которого содержит металлические элементы.

3D-принтеры, печатающие металлом, отличающиеся от других устройств трёхмерной печати более высоким весом и чаще всего большими габаритами, условно можно разбить на три группы:

1) *струйные принтеры, которые работают с пластиком и легкоплавкими металлами, например, свинцом или оловом.*

2) *3D-принтеры, работающие на основе металлического порошка со склеивающим веществом. На основе таких устройств печатаются прототипы, которые в дальнейшем подвергаются дополнительному обжигу.*

3) *3D-принтеры, которые работают на основе технологий плавки лазером. Такие детали широко применяются в промышленности [3].*

Из указанных трёх вариантов наиболее перспективно для изготовления элементов микромеханических датчиков выглядят 3D-принтеры, которые работают на основе технологий плавки лазером, имеющие более высокую точность. Среди таких технологий 3D-печати металлическим порошком можно выделить:

1) *Выборочное лазерное спекание, SLS (Selective Laser Sintering);*

2) *Выборочное лазерное плавление, SLM (Selective Laser Melting);*

3) *Электронно-лучевую плавку EBM (Electron Beam Melting);*

4) *Распыление наночастиц (NanoParticle Jetting).*

В. Выборочное лазерное спекание

Технология SLS основана на спекании порошков в готовое изделие с помощью лазера. Материал наносится слой за слоем, как и при технологии стереолитографии. В качестве материала печати могут быть использованы пластмассы, различные материалы на основе нейлона, молибдена, титана и нержавеющей стали 316L.

Изделия, изготовленные с помощью селективного лазерного спекания, превосходят металлические заготовки, созданные традиционным методом, по таким параметрам, как пористость и прочность. Однако у этой технологии имеется и ряд недостатков:

- "грязь" при производстве: порошок летуч и при неосторожном обращении поднимается в воздух, засоряя окружающее пространство и попадая в легкие человека;
- сложность последующей обработки (обжига) после печати, в специальной печи для окончательного спекания порошка;

- усадка детали после обжига, достигающая порой значений 30 % (а в среднем 8-10 %) от исходного объема, что накладывает ограничения на допуски точности и требует последующей механической обработки для приведения к требуемым значениям качества [3].

Одной из относительно новых и перспективных для изготовления элементов микромеханических датчиков разновидностей выборочного лазерного спекания выглядит технология «Распыления наночастиц» (NanoParticle Jetting). В основе данной технологии лежит применение металлических наночастиц, загруженных в специальные картриджи. Потом эти картриджи вставляются в систему XJet (известная компания XJet, которая впервые предложила использовать технологию трёхмерной печати объектов жидким металлом), и наночастицы пропускаются через распыляющие сопла, то есть материала для 3D-печати не нужно касаться руками, а значит, нет угрозы заражения токсичными веществами. Жидкий металл проходит через сопла со скоростью 221 капля в секунду. Готовое металлическое изделие подвергается легкому спеканию, и поддерживающие конструкции удаляются. Важно, что весь этот процесс практически не требует вмешательства оператора. [14].

С. Выборочное лазерное плавление

Технология выборочного лазерного плавления (SLM) заключается в нанесении слоя мелких металлических частиц и последующего их плавления лазерным лучом. Производственный процесс ведется в вакуумной камере, которая заполняется инертными газами.

В качестве материала могут быть использованы

- сплав бронзы и никеля, разработанный специально для данной технологии и позволяющий получить довольно высокое качество поверхности;
- нержавеющая сталь, обладающая довольно высокими механическими характеристиками (например, упругостью и прочностью на разрыв), устойчивостью к коррозии и относительно невысокой стоимостью;
- суперсплавы на основе никеля или кобальта, отличающиеся хорошей устойчивостью к высоким температурам, сплав кобальт-хром обладает еще и высокой удельной прочностью;
- легкие сплавы на основе алюминия или титана, отличающиеся хорошими механическими свойствами и низким весом;
- другие материалы, в том числе тугоплавкие и драгоценные металлы (золото, серебро и др.).

Ряд материалов, например, титан и алюминий, обладают высокой реакционной способностью, то есть могут взорваться, находясь в форме порошка. Печать ими обязательно должна производиться лишь в среде инертного газа (чаще всего Аргона).

Метод выборочного лазерного плавления позволяет получить элементы конструкции, имеющие размеры 400 мкм и даже меньше [15].

Д. Электронно-лучевая плавка

В процессе электронно-лучевой плавки металлический порошок плавится посредством воздействия электронных лучей. На основе данной технологии сегодня создаются детали и прототипы для медицинской сферы, аэрокосмической промышленности, автомобилестроения. Технология позволяет создавать крупные конструкции до десятков метров.

Е. Печать магнитных и диэлектрических слоев

При использовании технологий SLS, SLM или EBM поверхность может получаться шероховатой или с видимой слоистостью, минимальная толщина слоя составляет около 0,1–0,15 мм; по горизонтали же точность определяется фокусировкой лазерного луча.

Следует отметить, что использование так называемых методов прямой печати (direct-write methods), включающих в себя стереолитографию (SLA), моделирование сплавленным осаждением (FDM) и выборочное лазерное спекание (SLS) позволяет создавать в конструкции функциональные слои из пьезоэлектрических и магнитных (в том числе ферромагнитных) материалов [4]. Кроме того, иногда используется комбинация упомянутых методов прямой печати и так называемых «капельных» (drop deposition) методов. Так в работе [16] на основную конструкцию, полученную моделированием сплавленным осаждением (FDM), проводящий слой затем наносится «капельным» методом.

IV. АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Одной из задач, стоящих сегодня перед приборостроением, является создание прецизионных, высокочувствительных микромеханических инерциальных блоков, в которых использование процессорного управления и алгоритмов обработки информации было бы естественно в силу сущности способа их функционирования.

Чрезмерное увлечение минимизацией габаритов приборов привело к существенной потере их чувствительности к входному воздействию, увеличению влияния помех разного рода и, соответственно, снижению точности измерения.

Использование емкостных силовых преобразователей, имеющих исключительно малые силовые характеристики, требует уменьшения массы чувствительных элементов и приводит к необходимости использования резонансных режимов работы приборов. Более того, для обеспечения высокой добротности колебательной системы прибора необходимо осуществлять вакуумирование объема датчика, что само по себе является достаточно сложной технологической операцией. Типичный пример гребенчатой структуры электростатического силового преобразователя приведен на рис. 1, на котором представлен чувствительный элемент акселерометра ADLX76A американской компании Analog Devices [1].

Учитывая недостатки емкостных элементов, авторами доклада были разработаны конструктивные схемы, построенные с использованием новой элементной базы: магнитоэлектрических и электромагнитных компенсирующих преобразователей и оптоэлектронных датчиков положения инерционных масс. В частности, в разработан-

ном автоколебательном микромеханическом гироскопе (АММГ) была предложена схема с фотоэлектрическим датчиком положения и магнитоэлектрическим компенсирующим преобразователем [17]. Датчик представляет собой двухмассовый ММГ LL-типа. Конструктивная схема прибора показана на рис. 2.

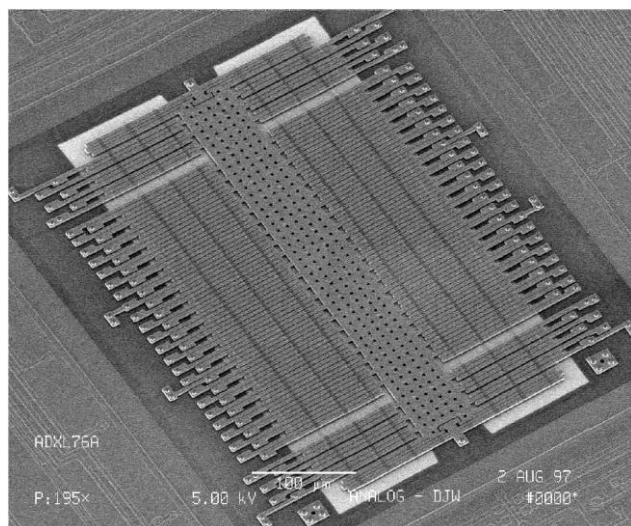


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента акселерометра ADXL76A

Две подвижные инерционные массы (ИМ) 1 и 10 закреплены на упругих элементах подвеса 16 и 11 в несущей раме в зазоре между двумя постоянными магнитами с возможностью линейного перемещения по двум взаимно перпендикулярным (продольной и поперечной) осям. ИМ представляют собой пластины из монокристаллического кремния с прямоугольными оптическими щелями 4 и 7.

В качестве датчиков положения (ДП) использованы оптоэлектронные преобразователи, состоящие из пар излучателей 3, 5, 6, 8 и фотоприемников 15, 14, 13, 12, построенные на основе бескорпусных элементов.

Компенсирующие преобразователи магнитоэлектрического типа представляют собой линейные двигатели с постоянными магнитами, закрепленными на крышках датчика, и токопроводящими элементами, реализованными путем напыления на поверхности каждой ИМ токопроводящих полосок 2 и 9.

Реализация автоколебательного режима работы осуществляется за счет введения в контур прибора нелинейного звена (компаратора и ключа), переключающего направление тока в токопроводящих полосках.

Вопросы улучшения метрологических характеристик микромеханических инерциальных датчиков за счёт автоколебательных низкочастотных режимов работы в дорезонансной области были рассмотрены в работе [18]. Было установлено, что реализация таких режимов позволит расширить возможности повышения эффективности получения информации, даст возможность решить вопросы повышения точностных характеристик и функциональных возможностей перспективных систем управления и навигации самых разнообразных подвижных объектов.

V. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Реализация автоколебательных режимов и высокие (относительно емкостных преобразователей) силовые характеристики магнитного силового преобразователя [19] позволяют увеличить массу чувствительного элемента, что приводит к увеличению чувствительности датчика. Это позволяет использовать материал 3D-печати, имеющий относительно высокий удельный вес. Увеличение массы чувствительного элемента приводит к увеличению размера упругих элементов подвеса, что снижает требования к точности их изготовления.

Это приводит к возможности рассмотрения использования современных методов высокотемпературной многослойной 3D-печати, в том числе печати металлом, для создания автоколебательных микромеханических приборов. Ранее такие технологии ещё не применялись широко для создания микромеханических инерциальных чувствительных элементов, хотя в целом ряде работ [4, 20, 21, 22] было описано использование стереолитографии (SLA), моделирования сплавленным осаждением (FDM) и выборочное лазерное спекание (SLS) для создания прототипов МЭМС.

Помимо низких механических характеристик материалов другой существенной проблемой для реализации технологии 3D-печати при создании микромеханических устройств является относительно низкое качество поверхностей и точность изготовления отдельных элементов конструкции.

В табл. 2 [4] приведены точность и допустимый размер модели для технологий стереолитографии (SLA), выборочное лазерное спекание (SLS), микролазерное спекание (MLS), моделирования сплавленным осаждением (FDM) и технологии PolyJet.

При использовании упомянутой ранее технологии XJet размер частиц и ультратонкие слои материала позволяют передавать мельчайшие детали и изготавливать изделия с тонкими стенками. Путём удаления поддерживающих материалов в данном случае можно легко создать изделия высокой сложности со сложной структурой, мельчайшими деталями и поверхностью хорошего качества (рис. 3) [14]. Минимальные размеры конструктивного элемента, созданного при помощи трехмерной печати, составляют 30-1000 мкм, что не позволяет полностью повторить модели микромеханических датчиков, полученные традиционными технологиями МЭМС. Традиционные ММА и ММГ для реализации своего конструктива требуют разрешение порядка 1-2 мкм. Однако, в предложенной в [17] конструкции автоколебательных датчиков отсутствуют гребенчатые датчики силы, с которыми в первую очередь связаны данные требования. Кроме того показатели точности производства современных 3D-принтеров существенно улучшились, и в ряде случаев, как было показано в данном докладе, приближаются к точности изготовления с использованием традиционных методов МЭМС.

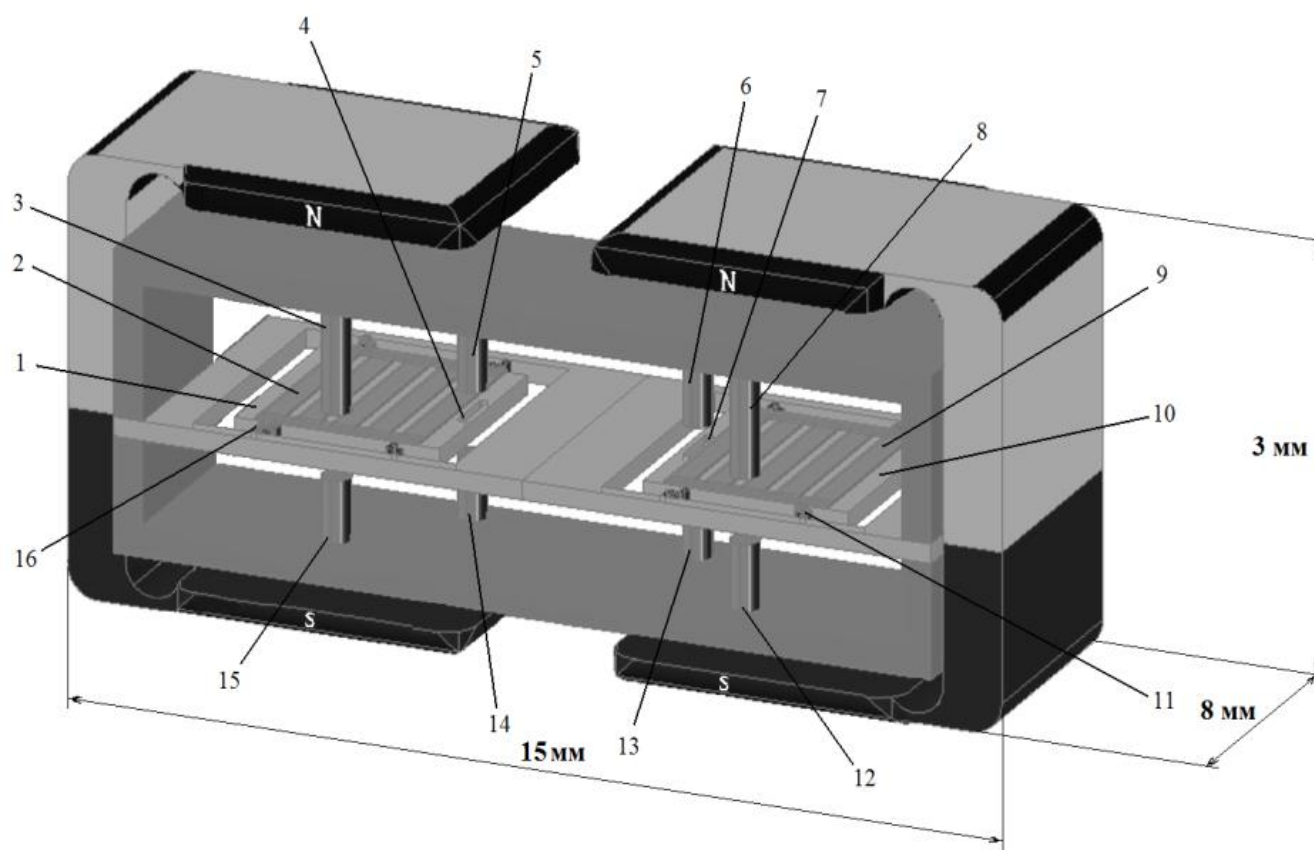


Рис. 2. Конструктивная схема автоколебательного микромеханического гироскопа (1, 10 – инерционные массы; 2, 9 – проводящие дорожки; 3, 5, 6, 8 – светодиоды; 19, 36 – прямоугольные оптические щели; 11, 16 – упругие элементы подвеса; 12, 15 – фототранзисторы (фототиристоры); 13, 14 – двухсегментные фототранзисторы (фототиристоры))

ТАБЛИЦА 2. - Точность и допустимый размер модели некоторых методов трехмерной печати.

Параметр	SLA	PolyJet	SLS	MLS
Толщина слоя, мкм	50-150	16-30	100	2-4
Минимальные размеры, мкм	250-890	1100	750-1000	32
Основные материалы	ABS-подобные пластмассы; поликарбонат; полиэтилен	ABS-пластмассы, полипропилен	Нейлон	Молибден SS316L, сплав бронза-хром, сплав алюминий-никель, нейлон
Максимальные размеры модели, мм	~ 600 × 700 × 500	~ 500 × 400 × 200	~ 300 × 300 × 400	~ 55 × 55 × 30
Комментарии	ABS-пластмассы могут быть подвергнуты ультразвуковой сварке	Самостоятельный выбор материала путем комбинирования материалов из библиотеки	Материалы с тепловой и химической устойчивостью	Проводящие материалы

В работах [4, 20, 21, 22] указано, что при применении технологий трехмерной печати сегодня можно достичь размеров порядка 50-500 мкм, и уже сегодня видны перспективы достижения размеров 1-10 мкм, что стимулирует более активное использование технологий 3D-печати для широкого спектра различных микромеханических датчиков.

VI. Выводы

Проанализировав современное состояние технологий, можно прийти к выводу, что последние достижения позволяют все более и более нивелировать основные препятствия для создания микромеханических устройств при по-

мощи методов трехмерной печати: низкие механические свойства материалов и малую точность изготовления. Следует отметить, что в основном были рассмотрены коммерчески реализованные методы 3D-печати. С учётом активного академического исследования трехмерной печати, что подтверждает большое количество научных статей на эту тему, предполагается дальнейшее активное развитие данной технологии. Уже сейчас активно обсуждается создание прототипов МЭМС с использованием 3D-печати.

Проведены опыты по созданию макромоделей конструкций автоколебательных датчиков из пластика с помощью 3D-принтера. В будущих исследованиях для со-

здания автоколебательных датчиков планируется использования более современных технологий трехмерной печати, обзор которых приведен ранее. Они позволят использовать для упругих элементов подвеса датчика материалы, обладающие более высокими механическими характеристиками.



Рис. 3. Пример изделия, изготовленного по технологии XJet

Ряд широко используемых методов 3D-печати, таких как стереолитография (SLA), моделирование сплавленным осаждением (FDM) и выборочное лазерное спекание (SLS), позволяют создавать слои из магнитных материалов, что делает возможным реализацию магнитоэлектрического датчика силы автоколебательного датчика прямо в процессе печати инерциальной массы без дополнительных процедур.

Точность изготовления элемента конструкции и разрешение трехмерной печати пока недостаточны для производства классических микромеханических инерциальных датчиков. Постоянное повышение этих параметров в новых разработках показывает, что в ближайшее время точность печати порядка десятков микрометров может быть достигнута. Отсутствие гребенчатых структур в конструкции автоколебательных микромеханических инерциальных датчиков позволяет использовать современные технологии трехмерной печати для их создания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тыртычный А.А., Скалон А.И. Микромеханические гироскопы: состояние разработок и перспективы развития // Датчики и системы. – 2012. - № 2. – С. 59-68.
 - [2] Тыртычный А.А. Разработка принципов построения и анализ характеристик автоколебательного микромеханического гироскопа: дис. ... канд. техн. наук: СПб НИУ ИТМО, СПб., 2014. – 149 с.
 - [3] Мирзахакимов С.Б., Султанова Ф.Р. Технологии 3D принтеров, использующие для печати металл // Вестник КГУСТА. – 2016. - №3. – С. 18-23.
 - [4] V.A. Lifton, G. Lifton, S. Simon, "Options for additive rapid prototyping methods (3D printing) in MEMS technology", Rapid Prototyping Journal, Vol. 20, Iss. 5, 2014, pp. 403 – 412.
 - [5] A. Bertsch, S. Jiguet, P. Bernhard, P. Renaud, A. Pique, A.S. Holmes, D.B. Dimos, "Microstereolithography: a review", in Symposium on Rapid Prototyping Technologies, Vol. 758, MRS, Boston, 2003, pp. 3-15.
 - [6] C. Sun, N. Fang, D.M. Wu and X. Zhang, "Projection microstereolithography using digital micro-mirror dynamic mask", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 121 No. 1, 2005, pp. 113-120.
 - [7] E. C. Santos, M. Shiomi, "Rapid manufacturing of metal components by laser forming", International Journal of Machine Tools & Manufacture, № 46, 2005, pp. 1459-1468.
 - [8] Алехин М.В., Петросян А. Е., Шаховцев К. В. Перспективы развития 3D печати металлами / Международная научно-практическая конференция «Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований». Часть 3. – Стерлитамак: АМИ, 2017, С. 7-9.
 - [9] S.B. Fuller, E.J. Wilhelm, and J.M. "Jacobson, Ink-Jet Printed Nanoparticle Microelectromechanical Systems", Journal of micromechanical systems, Vol. 11, NO. 1, 2002, pp. 54-60.
 - [10] G.C. Anzalone, C. Zhang, B. Wijnen, P.G. Sanders and J.M. Pearce, "Low-Cost Open Source 3-D Metal Printing", IEEE Access, 1, 2013, pp.803-810.
 - [11] William E. Frazier "Metal Additive Manufacturing: A Review", Volume 23, Issue 6, 2014, pp. 1917-1928.
 - [12] S. Hong, C. Sanchez, H. Du, N. Kim, "Fabrication of 3D Printed Metal Structures by Use of High-Viscosity Cu Paste and a Screw Extruder", Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 44, No. 3, 2015, pp. 836-841.
 - [13] J.H.Martin, B.D. Yahata, J.M. Hundley, J.A. Mayer, T.A. Schaedler, T.M. Pollock, "3D printing of high-strength aluminium alloys", Nature, Vol. 549, 2017, pp. 365-379.
 - [14] <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/3d-printing-with-metal-xjet-will-present-nanoparticle-jetting-technolo/>
 - [15] S. Khilil, P. Berce, D. Leordean, S. Rodean, "Direct fabrication of metal components using laser forming techniques", Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 55, Issue IV, 2012, pp. 795-802.
 - [16] E. Malone, K. Rasa, D. Cohen, T. Isaacson, H. Lashley, and L. Hod, "Freeform fabrication of zinc-air batteries and electromechanical assemblies", Rapid Prototyping Journal, Vol. 10 No. 1, 2004, pp. 58-69.
 - [17] Пат. 2602407 Российская Федерация, МПК G01C. Микромеханический датчик угловой скорости с цифровым выходом / Скалон А.И., Тыртычный А.А.; заявитель и патентообладатель ГУАП. - № 2015129849/28; заявл. 20.07.2015; опубл. 20.11.2016, Бюл. № 32. – 12 с. : ил.
 - [18] Тыртычный А.А. Анализ характеристик автоколебательного микромеханического гироскопа // Приборы. – 2010. - № 4. – С. 37-44.
 - [19] A. Tirtichny A. The comparative analysis of characteristics of compensating converters of micromechanical inertial sensors. Information and communication technologies: problems, perspectives. 2008, pp. 76-80.
 - [20] C.K. Chua, K.F. Leong, C.S. Lim, Rapid prototyping: principles and applications. World Scientific, Singapore; Hackensack, NJ. 2004.
 - [21] D. Dimitrov, K. Schreve, and N. de Beer, "Advances in three dimensional printing – state of the art and future perspectives", Rapid Prototyping Journal, Vol. 12 No. 3, 2006, pp. 136-147.
- I. Gibson, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer, London, New York, NY. 2010.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Статистический анализ результатов измерений: методы, критерии проверки гипотез, проблемы применения и их решение

Б. Ю. Лемешко, П. Ю. Блинов, И. В. Веретельникова, С. Б. Лемешко, А. Ю. Новикова

Кафедра теоретической и прикладной информатики
Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия
Lemeshko@ami.nstu.ru

Аннотация — В докладе рассматриваются методы и критерии проверки статистических гипотез, применяемых при статистическом анализе результатов (ошибок) измерений или сличении результатов измерений, выполняемых различными лабораториями. В частности, рассматриваются проблемы применения критериев согласия при проверке сложных гипотез и пути их решения. Приводятся результаты сравнительного анализа множества критериев, используемых при проверке нормальности с указанием достоинств и недостатков рассмотренных критериев, а также совокупности критериев, применяемых для проверки равномерности. Представляются результаты сравнительного анализа совокупности критериев проверки гипотез об однородности законов распределения, предлагаются новые критерии и представляются построенные модели предельных распределений статистик этих критериев. Приводятся результаты сравнительного анализа множества критериев, применяемых при проверке гипотез об однородности средних, и множества параметрических и непараметрических критериев, применяемых при проверке гипотез о равенстве дисперсий. Рассматриваются вопросы разработки программного обеспечения, гарантирующего корректность статистических выводов при использовании рассмотренных множеств критериев.

Ключевые слова—оценивание параметров; проверка статистических гипотез; критерии согласия; критерии нормальности; критерии равномерности; критерии однородности; мощность критериев

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкий спектр методов статистического анализа в силу ряда объективных и субъективных причин весьма ограничено используется в задачах метрологического обеспечения и анализа результатов измерений. С одной стороны, это связано с тем, что специалисты, занимающиеся измерениями и их анализом, зачастую не знакомы с новыми результатами в силу отсутствия информации, либо с тем, что применение таких методов требует использования сложного программного обеспечения. С другой стороны, причиной такого состояния является и негативный опыт использования статистических методов в условиях нарушения стандартных предположений, обуславливающих корректность применения этих методов. Не последнюю роль играет и то, что реальные свойства критериев проверки статистических гипотез, применяемых при ограниченных объемах выборок, порой суще-

ственно отличаются от асимптотических свойств этих критериев.

В данной работе очень кратко остановимся на методах и критериях проверки статистических гипотез, применение которых наиболее перспективно в задачах метрологического обеспечения и анализа результатов измерений, на проблемах, связанных с использованием критериев, и способах их разрешения с опорой на программное обеспечение.

Результаты, о которых будет говориться далее, получены с использованием подхода, предложенного в [1], и развиваемой программной системы ISW [2].

II. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

Наиболее часто решаемой задачей является построение параметрической модели закона распределения наблюдаемой случайной величины (ошибки измерения). Классический подход к идентификации закона распределения заключается в последовательной реализации двухэтапной процедуры для каждого вида параметрической модели из рассматриваемого множества законов. На первом этапе по выборочным данным строится модель закона определенного вида, оцениваются параметры этой модели. На втором этапе оценивается степень адекватности полученной модели экспериментальным наблюдениям, как правило, с применением различных критериев согласия.

В качестве оценок параметров могут использоваться оценки максимального правдоподобия (ОМП), MD-оценки, получаемые при минимизации различных расстояний между эмпирической и теоретической функциями распределения, а также оценки, получаемые другими методами. В MD-оценках в качестве расстояний могут использоваться статистики непараметрических критериев согласия (Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлинга). Наилучшими статистическими свойствами обладают ОМП, но они не являются робастными. Для получения робастных оценок ОМП могут вычисляться по группированным данным.

В качестве моделей законов распределения для наблюдаемых случайных величин (ошибок измерений) в ISW [2] даётся возможность использовать более 3-х десятков параметрических законов, наиболее часто применяемых в приложениях, а также строить модели в виде смеси законов. Описание основной части включенных в [2] параметрических законов приведено в [1].

Заметим, что вид используемых оценок, как правило, отражается на распределениях статистик критериев, используемых при проверке адекватности построенной модели.

Для проверки адекватности могут использоваться различные непараметрические критерии согласия и критерии типа χ^2 .

III. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СОГЛАСИЯ

При проверке согласия различают простые и сложные гипотезы. Простая проверяемая гипотеза имеет вид $H_0: F(x) = F(x, \theta)$, где $F(x, \theta)$ – функция распределения вероятностей, с которой проверяют согласие наблюдаемой выборки, а θ – известное значение параметра (скалярного или векторного). Сложная проверяемая гипотеза имеет вид $H_0: F(x) \in \{F(x, \theta), \theta \in \Theta\}$, где Θ – область определения параметра θ .

Проблемы возникают, если при проверке сложной гипотезы оценку $\hat{\theta}$ параметра распределения вычисляют по той же самой выборке, по которой проверяют согласие. Далее, говоря о проверке сложных гипотез, мы, как правило, будем предполагать, что оценка параметра $\hat{\theta}$ вычисляется по той же выборке.

A. Проверка простых гипотез

Все классические непараметрические критерии согласия предназначены для проверки простых гипотез. При проверке простых гипотез они являются свободными от распределения, то есть распределения статистик критериев при справедливости H_0 не зависят от вида закона $F(x, \theta)$, с которым проверяется согласие.

В критерии Колмогорова рекомендуется использовать статистику с поправкой Большева в форме [3]

$$S_K = \sqrt{n}D_n + \frac{1}{6\sqrt{n}} = \frac{6nD_n + 1}{6\sqrt{n}},$$

где $D_n = \max(D_n^+, D_n^-)$, $D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - F(x_i, \theta) \right\}$;

$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ F(x_i, \theta) - \frac{i-1}{n} \right\}$, $x_1, x_2, \dots, x_n$ – упорядоченные по возрастанию выборочные значения, n – объем выборки. В случае справедливости простой гипотезы распределение статистики сходится равномерно к функции распределения Колмогорова $K(s)$ [3].

Статистика критерия Крамера–Мизеса–Смирнова имеет вид

$$S_{\omega} = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left\{ F(x_i, \theta) - \frac{2i-1}{2n} \right\}^2$$

и при справедливости простой гипотезы в пределе подчиняется закону с функцией распределения $a1(s)$ [3].

Статистика критерия Андерсона–Дарлингга имеет вид

$$S_{\Omega} = -n - 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{2i-1}{2n} \ln F(x_i, \theta) + \left(1 - \frac{2i-1}{2n} \right) \ln(1 - F(x_i, \theta)) \right\}$$

и при справедливости простой проверяемой гипотезы подчиняется закону с функцией распределения $a2(s)$ [3].

В критерии Купера целесообразно использовать либо модификацию [4] статистики вида

$$V = (D_n^+ + D_n^-) \left(\sqrt{n} + 0.155 + \frac{0.24}{\sqrt{n}} \right),$$

либо модификацию [5] вида

$$V_n^{mod} = \sqrt{n}(D_n^+ + D_n^-) + \frac{1}{3\sqrt{n}}.$$

Статистика критерия Ватсона и используется в форме

$$U_n^2 = \sum_{i=1}^n \left(F(x_i, \theta) - \frac{i-1/2}{n} \right)^2 - n \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F(x_i, \theta) - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{12n}.$$

Авторами критериев получены распределения статистик при справедливости простой проверяемой гипотезы, вид которых приведен также в [5].

Статистики непараметрических критериев согласия Жанга [6] имеют вид:

$$Z_K = \max_{1 \leq i \leq n} \left(\left(i - \frac{1}{2} \right) \log \left\{ \frac{i-1/2}{nF(x_i, \theta)} \right\} + \left(n - i + \frac{1}{2} \right) \log \left[\frac{n-i+1/2}{n\{1-F(x_i, \theta)\}} \right] \right),$$

$$Z_A = - \sum_{i=1}^n \left[\frac{\log \{F(x_i, \theta)\}}{n-i+1/2} + \frac{\log \{1-F(x_i, \theta)\}}{i-1/2} \right],$$

$$Z_C = \sum_{i=1}^n \left[\log \left\{ \frac{[F(x_i, \theta)]^{-1} - 1}{(n-1/2)/(i-3/4) - 1} \right\} \right]^2.$$

Использование этих критериев осложняет сильная зависимость распределений статистик от объема выборки n . Обойти этот недостаток можно за счет использования интерактивного режима исследования распределений статистик применяемых критериев [5].

B. Проверка сложных гипотез

При проверке сложных гипотез свобода от распределения исчезает [7].

При проверке сложных гипотез, когда по той же самой выборке оценивают параметры наблюдаемого закона распределения вероятностей, все рассматриваемые непараметрические критерии согласия теряют свойство «свободы от распределения». Более того, предельные распределения статистик непараметрических критериев согласия зависят от целого ряда факторов, определяющих «сложность» гипотезы.

На закон распределения статистики $G(S|H_0)$ влияют следующие факторы [5]:

- вид наблюдаемого закона распределения $F(x, \theta)$, соответствующего истинной гипотезе H_0 ;
- тип оцениваемого параметра и число оцениваемых параметров;
- используемый метод оценивания параметров;
- в некоторых ситуациях конкретное значение параметра (например, в случае бета- и гамма-распределений).

Игнорирование того, что проверяют сложную гипотезу, и того, что сложные гипотезы могут быть различными, приводит к некорректному применению непараметрических критериев согласия и, как следствие, к неверным статистическим выводам. Различия в предельных распределениях тех же самых статистик при проверке простых и сложных гипотез настолько существенны, что пренебрегать этим абсолютно недопустимо [5]. Большинство ошибок, совершаемых при использовании непараметрических критериев согласия, связано с незнанием этих обстоятельств. Как правило, при проведении статистического анализа после оценивания по выборке параметров вычисляют значение статистики применяемого критерия, сравнивая его с критическим значением, имеющим место при проверке простой гипотезы, ошибочно не отклоня проверяемую гипотезу.

За более чем 50 лет с использованием аналитических методов решение проблемы проверки сложных гипотез с использованием непараметрических критериев согласия практически не сдвинулось с места. А вот с использованием компьютерных технологий и методов статистического моделирования [1] удалось построить модели предельных распределений статистик для случая проверки сложных гипотез относительно ряда законов распределений, в основном, для ситуации с использованием ОМП. Построенные модели представлены в руководстве [5]. В ситуациях, когда распределения статистик зависят от конкретных значений оценок параметра или параметров, заранее построить модель предельного распределения статистики критерия невозможно. И здесь выход также кроется в использовании компьютерных технологий, позволяющих в интерактивном режиме (после вычисления оценок параметров и значения статистики критерия) моделировать распределение статистики, а уже по нему находить достигнутый уровень значимости p_{value} и принимать решение о результатах проверки [5]. Именно таким образом решается данная проблема в [2] при использовании непараметрических критериев согласия, в том числе, критериев Жанга. В [5] приведены также результаты сравнительного анализа мощности непараметрических критериев согласия.

IV. КРИТЕРИИ СОГЛАСИЯ ТИПА χ^2

Статистику критерия согласия χ^2 Пирсона вычисляют по формуле

$$X_n^2 = n \sum_{i=1}^k \frac{(n_i / n - P_i(\theta))^2}{P_i(\theta)},$$

где k – число интервалов, n_i – количество наблюдений в интервале, $P_i(\theta)$ – вероятность попадания в интервал.

В случае справедливости простой гипотезы в пределе эта статистика подчиняется χ_r^2 -распределению с $r = k - 1$ степенями свободы.

В случае проверки сложной гипотезы и справедливости H_0 при условии, что оценки параметров находятся в результате минимизации статистики X_n^2 по этой же самой выборке, статистика X_n^2 асимптотически распределена как χ_r^2 с числом степеней свободы $r = k - m - 1$, где m – число оцененных параметров. Это же верно, если использовать ОМП или другие асимптотически эффективные оценки по группированным данным.

При использовании любых оценок по негруппированным данным распределение $G(X_n^2|H_0)$ статистики X_n^2 будет отличаться от χ_r^2 -распределения.

Естественно, что ОМП по негруппированным данным более предпочтительны. В этой связи появились критерии Никулина–Рао–Робсона [8, 9], предельными распределениями статистик которых являются χ_{k-1}^2 -распределения, а затем и другие модификации критерия. Статистики этих критериев отличаются от статистики критерия X_n^2 только в случае сложной гипотезы и, как правило, несколько выигрывают в мощности. В то же время следует заметить, что использование этих критериев без соответствующего программного обеспечения затруднительно.

Необходимо отметить, что мощность критериев типа χ^2 зависит от числа интервалов и того, как область определения случайной величины разбивается на интервалы. Используя асимптотически оптимальное группирование, можно максимизировать мощность критерия χ^2 Пирсона относительно близких конкурирующих гипотез [1]. В этом случае, при проверке простых гипотез критерий χ^2 Пирсона имеет преимущество в мощности по сравнению с непараметрическими критериями согласия.

V. КРИТЕРИИ ПРОВЕРКИ НОРМАЛЬНОСТИ

Принадлежность наблюдаемых данных нормальному закону является необходимой предпосылкой для корректного применения большинства классических методов математической статистики, используемых в задачах обработки измерений, стандартизации и контроля качества. Поэтому проверка на отклонение от нормального закона является частой процедурой в ходе проведения измерений, контроля и испытаний, имеющей особое значение, так как далеко не всегда ошибки измерений, связанные с приборами, построенными на различных физических принципах, или ошибки наблюдений некоторого контролируемого показателя подчиняются нормальному закону. В таких случаях применение классического аппарата, опирающегося на предположение о нормальности наблюдаемого закона, оказывается некорректным и может приводить к неверным выводам.

Действующий ГОСТ [10] охватывает лишь малую часть из существующего множества критериев, ориентированных непосредственно на проверку нормальности, или критериев, которые могут быть использованы для проверки отклонения наблюдаемых данных (ошибок измерений) от нормального закона. В нём не говорится ни

об использовании в данных целях критериев типа χ^2 , ни об использовании непараметрических критериев согласия. Содержание стандарта и ограниченность перечня включенных в него критериев не позволяет его пользователям ориентироваться в том, какой из критериев наиболее предпочтителен для применения.

В руководстве [11] представлены результаты исследований свойств 15 специальных критериев, ориентированных только на проверку принадлежности выборок нормальному закону, а в системе [2] возможно применение более 25 подобных критериев, не считая рассмотренных выше критериев согласия.

Существенным недостатком значительной части специальных критериев является зависимость распределений статистик от объемов выборок. Имеющаяся информация о распределениях статистик представлена лишь ограниченными таблицами критических значений. Поэтому по результатам применения критерия нельзя оценить достигнутый уровень значимости p_{value} , а при объемах выборок больших, чем фигурируют в таблице критических значений, применение критериев оказывается вовсе проблематичным.

Проведенные исследования показали и другие недостатки некоторых критериев. Оказалось, что ряд критериев (например, Шапиро–Уилка, Эппса–Палли, Хегази–Грина и др.) при малых объемах выборок не способен отличить от нормального конкурирующие законы с чуть более “лёгкими” хвостами. Аналогичную смещённость продемонстрировали и критерии согласия Жанга со статистиками Z_A и Z_K . Сравнительный анализ критериев показал, что некоторые специальные критерии, продемонстрировавшие неудовлетворительные свойства, применять нецелесообразно. И в то же время, при проверке нормальности не следует опираться на какой-то один из критериев, так как нет критерия, обладающего большей мощностью относительно любой альтернативы. В целом, лучшие из специальных критериев показали некоторое преимущество в мощности по сравнению с непараметрическими критериями согласия.

В программной системе [2] при использовании критериев нормальности, вид распределений статистик которых при справедливости H_0 не известен, реализован интерактивный режим моделирования распределений этих статистик при величине n , соответствующей объёму анализируемой выборки, с использованием построенного распределения для оценки p_{value} .

VI. КРИТЕРИИ ПРОВЕРКИ РАВНОМЕРНОСТИ

В прикладной математической статистике и в метрологии равномерный закон распределения вероятностей занимает видное место. Именно этим определяется наличие множества специальных критериев, целенаправленно построенных для проверки гипотезы о принадлежности анализируемой выборки равномерному закону (Шермана, Кимбелла, Морана, Ченга–Спиринга, Хегази–Грина, Янга, Фросини, Гринвуда, Гринвуда–Кэсберри–Миллера, Неймана–Бартона и др.). Для проверки гипотезы о равномерности может использоваться совокупность непараметрических критериев согласия и критерий χ^2 Пирсона. Хотя история применения многих критериев насчитывает уже

несколько десятилетий, появляются публикации с предложениями новых критериев равномерности.

В то же время, не смотря на множество публикаций не хватает объективной информации о действительных свойствах критериев, их достоинствах и недостатках. Можно натолкнуться на авторитетные мнения о целесообразности применения тех или иных критериев, которые не подкрепляются результатами сравнительного анализа и не всегда подтверждаются при проверке. Специалистов же, сталкивающихся в своей практической деятельности с необходимостью проверки гипотез о принадлежности наблюдений или ошибок измерений равномерному закону, интересует, какие критерии предпочтительнее использовать и почему.

В руководстве [12] сконцентрированы результаты исследований свойств более 20 специальных критериев, ориентированных только на проверку принадлежности выборок равномерному закону, а также сравнительного анализа этого множества с критериями согласия.

Подбор конкурирующих, используемых при исследовании мощности критериев, позволил оценить достоинства и указать на существенные недостатки некоторых популярных критериев равномерности.

При малых объемах выборок факт смещённости относительно некоторых альтернатив был отмечен для следующих критериев: Неймана–Бартона (со статистиками N_2 , N_3 , N_4), Хегази–Грина (со статистиками T_1 , T_2 , T_1^* , T_2^*), Фросини, Гринвуда–Кэсберри–Миллера, Кимбелла, Морана 1, Гринвуда, Шермана, Кресси 1, Морана 2, Янга, Дудевича–ван дер Мюлена и 2-х модификаций энтропийного критерия. Этот недостаток не зафиксирован лишь для 4-х критериев (Кресси 2, Шварца, Пардо, Ченга–Спиринга), которые в среднем продемонстрировали не очень высокую мощность. Интересно, что в тех же ситуациях смещённость проявили непараметрические критерии согласия Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлинга и критерии Жанга.

В то же время анализ мощности при проверке равномерности показал, что непараметрические критерии, особенно, Андерсона–Дарлинга и Жанга со статистикой Z_A не уступают лучшим специальным критериям.

В системе [2] при использовании критериев равномерности, распределения статистик которых представлены таблицами критических значений, оценки p_{value} вычисляются по моделируемому в интерактивном режиме распределению статистик этих критериев.

VII. КРИТЕРИИ ОДНОРОДНОСТИ ЗАКОНОВ

С необходимостью решения задач проверки гипотез о принадлежности двух (или более) выборок случайных величин одной и той же генеральной совокупности (проверки однородности) сталкиваются в различных областях. Такая задача естественно возникает при сличении результатов лабораторных измерений, или аттестации средств измерений, когда пытаются убедиться в том, что закон распределения случайных ошибок не претерпел существенных изменений по истечении некоторого интервала времени.

В настоящей работе мы остановимся только на k -выборочных критериях. Задача проверки однородности k

выборка формулируется следующим образом. Пусть x_{ij} j -е наблюдение i -й выборки $j = \overline{1, n_i}$, $i = \overline{1, k}$. Предполагается, что i -й выборке соответствует непрерывная функция распределения $F_i(x)$. Проверяется гипотеза вида $H_0: F_1(x) = F_2(x) = \dots = F_k(x)$ без указания общего для них закона распределения.

Общий подход к построению k -выборочных критериев однородности законов, являющихся аналогами двухвыборочных критериев Колмогорова–Смирнова и Крамера–Мизеса (Лемана–Розенблатта), рассматривался в работе [13]. При этом подходе статистика критерия представляет собой меру отклонения эмпирических распределений, соответствующих конкретным выборкам, от эмпирического распределения, построенного по совокупности анализируемых выборок. О k -выборочном варианте критерия Колмогорова–Смирнова, построенного по этому принципу, упоминается в [14, 15]. k -выборочный вариант критерия Андерсона–Дарлингa предложен в [16]. Построенные Жангом в [17] критерии однородности являются развитием критериев однородности Смирнова [3], Лемана–Розенблатта [18, 19] и Андерсона–Дарлингa [20] и позволяют анализировать $k \geq 2$ выборок.

Применение k -выборочных критериев на практике сдерживается тем, что, в лучшем случае, известны лишь критические значения статистик для соответствующих k , как в случае критерия Андерсона–Дарлингa [16] или критериев типа Колмогорова–Смирнова [14, 15], а возможность использования критериев Жанга [17] упирается в необходимость для формирования вывода о результатах проверки гипотезы искать распределения статистик критериев (или оценки достигнутого уровня значимости P_{value}) с использованием статистического моделирования. Исключение составляет лишь критерий однородности χ^2 , для которого известны асимптотические распределения статистики при справедливости H_0 .

А. Критерий Андерсона–Дарлингa

Статистика k -выборочного критерия Андерсона–Дарлингa в [20] находится следующим образом. По k выборкам строится объединённая упорядоченная выборка

$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_n$ объёмом $n = \sum_{i=1}^k n_i$, по которой вычисляется

$$A_{kn}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(nM_{ij} - jn_i)^2}{j(n-j)},$$

где M_{ij} – число элементов в i -й выборке, которые не больше чем X_j . Статистика критерия имеет вид

$$T_{kn} = [A_{kn}^2 - (k-1)] / \sqrt{D[A_{kn}^2]},$$

где дисперсия определяется выражением

$$D[A_{kn}^2] = \frac{an^3 + bn^2 + cn + d}{(n-1)(n-2)(n-3)}$$

при

$$a = (4g - 6)(k - 1) + (10 - 6g)H,$$

$$b = (2g - 4)k^2 + 8hk + (2g - 14h - 4)H - 8h + 4g - 6,$$

$$c = (6h + 2g - 2)k^2 + (4h - 4g + 6)k + (2h - 6)H + 4h,$$

$$d = (2h + 6)k^2 - 4hk,$$

где

$$H = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i}, \quad h = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{i}, \quad g = \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=i+1}^{n-1} \frac{1}{(n-i)j}.$$

Распределения статистики T_{kn} в [20] представлены лишь критическими значениями. Асимптотические распределения статистики зависят от числа сравниваемых выборок k и не зависят от n_i . В [21, 22] на основании результатов статистического моделирования были построены модели предельных распределений статистики T_{kn} для $k = 2 \div 11$. Приведенные в [21] модели построены по смоделированным выборкам статистики при числе имитационных экспериментов $N = 10^6$ и $n_i = 10^3$.

Критерии однородности Жанга [17] позволяют сравнивать $k \geq 2$ выборок.

Пусть $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in_i}$ упорядоченные выборки непрерывных случайных величин с функциями распределения $F_i(x)$, ($i = \overline{1, k}$) и, как и ранее, $X_1 < X_2 < \dots < X_n$, где $n = \sum_{i=1}^k n_i$, объединённая упорядоченная выборка. Обозначим R_{ij} ранг j -го упорядоченного наблюдения x_{ij} i -й выборки в объединённой выборке. Пусть $X_0 = -\infty$, $X_{n+1} = +\infty$, а ранги $R_{i,0} = 1$, $R_{i,n_i+1} = n + 1$.

В критериях используется модификация эмпирической функции распределения $\hat{F}(t)$, принимающая в точках разрыва X_m , $m = \overline{1, n}$, значения $\hat{F}(X_m) = (m - 0.5)/n$ [17].

Статистика Z_K критерия Жанга имеет вид:

В. Критерии Жанга

$$Z_K = \max_{1 \leq m \leq n} \left\{ \sum_{i=1}^k n_i \left[F_{i,m} \ln \frac{F_{i,m}}{F_m} + (1 - F_{i,m}) \ln \frac{1 - F_{i,m}}{1 - F_m} \right] \right\},$$

где $F_m = \hat{F}(X_m)$, так что $F_m = (m - 0.5)/n$, а вычисление $F_{i,m} = \hat{F}_i(X_m)$ осуществляется следующим образом. В начальный момент значения $j_i = 0$, $i = \overline{1, k}$. Если $R_{i,j_i+1} = m$, то $j_i := j_i + 1$ и $F_{i,m} = (j_i - 0.5)/n_i$, в противном случае если $R_{i,j_i} < m < R_{i,j_i+1}$, то $F_{i,m} = j_i/n_i$.

Критерий *правосторонний*: проверяемая гипотеза H_0 отклоняется при *больших* значениях статистики.

Статистика Z_A критерия задается выражением:

$$Z_A = -\sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^k n_i \frac{F_{i,m} \ln F_{i,m} + (1 - F_{i,m}) \ln (1 - F_{i,m})}{(m - 0.5)(n - m + 0.5)},$$

где F_m и $F_{i,m}$ вычисляются, как определено выше.

Критерий *левосторонний*: проверяемая гипотеза отклоняется при *малых* значениях статистики.

Статистика Z_C критерия Жанга определяется выражением:

$$Z_C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \ln \left(\frac{n_i}{j - 0.5} - 1 \right) \ln \left(\frac{n}{R_{i,j} - 0.5} - 1 \right).$$

Этот критерий также *левосторонний*: проверяемая гипотеза H_0 отклоняется при *малых* значениях статистики. Распределения статистик критериев Жанга зависят от объёмов выборок и от числа анализируемых выборок, что осложняет использование критериев.

В то же время, отсутствие информации о законах распределения статистик в современных условиях не является серьёзным недостатком критериев. В программном обеспечении, осуществляющем поддержку применения критериев, несложно организовать вычисление p_{value} , используя методы статистического моделирования, как это и реализуется в [2].

С. Критерии на базе 2-выборочных

Для анализа k выборок можно к каждой паре применить двухвыборочный критерий со статистикой S (всего $(k-1)k/2$ пар), а решение о принятии или отклонении гипотезы H_0 принимать по совокупности результатов. В качестве статистики такого k -выборочного критерия (в случае использования правостороннего двухвыборочного критерия) можно рассмотреть, например, статистику вида

$$S_{\max} = \max_{\substack{1 \leq i \leq k \\ i < j \leq k}} \{S_{i,j}\},$$

где $S_{i,j}$ – значения статистик используемого двухвыборочного критерия, вычисленные при анализе i -й и j -й выборок.

Проверяемая гипотеза H_0 будет отклоняться при **больших** значениях статистики $S_{\max}$. Преимуществом такого рода критерия является и то, что в результате будет определена пара выборок, различие между которыми окажется наиболее значимым с позиций используемого двухвыборочного критерия.

В качестве $S_{i,j}$ можно использовать статистики двухвыборочных критериев Смирнова, Лемана–Розенблата, Андерсона–Дарлинга. В этом случае распределения соответствующих статистик $S_{\max}$ сходятся к некоторым предельным (при данном k), модели которых могут быть найдены по результатам статистического моделирования.

Критерий максимума Смирнова. Используемая в критерии Смирнова статистика D_{n_2, n_1} вычисляется в соответствии с соотношениями [3]:

$$D_{n_2, n_1}^+ = \max_{1 \leq r \leq n_2} \left[\frac{r}{n_2} - F_{1n_1}(x_{2r}) \right] = \max_{1 \leq s \leq n_1} \left[F_{2n_2}(x_{2s}) - \frac{s-1}{n_1} \right],$$

$$D_{n_2, n_1}^- = \max_{1 \leq r \leq n_2} \left[F_{1n_1}(x_{2r}) - \frac{r-1}{n_2} \right] = \max_{1 \leq s \leq n_1} \left[\frac{s}{n_1} - F_{2n_2}(x_{1s}) \right],$$

$$D_{n_2, n_1} = \max(D_{n_2, n_1}^+, D_{n_2, n_1}^-).$$

При справедливости гипотезы H_0 и неограниченном увеличении объёмов выборок статистика

$$S_C = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} D_{n_2, n_1}$$

подчиняется распределению Колмогорова $K(S)$.

В k -выборочном критерии максимума Смирнова в качестве $S_{i,j}$ предпочтительней использовать модификацию статистики Смирнова

$$S_{\text{mod}} = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \left(D_{n_2, n_1} + \frac{n_1 + n_2}{4.6 n_1 n_2} \right),$$

распределение которой всегда ближе к предельному распределению Колмогорова $K(S)$ [23]. Статистику $S_{\max}$ в этом случае будем обозначать как $S_{\max}^{Sm}$.

При равных объёмах сравниваемых выборок распределения статистики $S_{\max}^{Sm}$ (как и в двухвыборочном варианте) обладают существенной дискретностью и отличаются от асимптотических (предельных) распределений. Если есть такая возможность, то предпочтительней в качестве n_i выбирать взаимно простые числа, тогда распределения $G(S|H_0)$ статистики $S_{\max}^{Sm}$ практически не отличаются от асимптотических.

Модели асимптотических распределений статистики $S_{\max}^{Sm}$ при числе сравниваемых выборок $k = 3 \div 11$ построены в [24] по результатам статистического моделирования. Хорошими моделями оказались законы семейства бета-распределений 3-го рода с плотностью

$$f(x) = \frac{\theta_2}{\theta_3 B(\theta_0, \theta_1)} \left(\frac{x - \theta_4}{\theta_3} \right)^{\theta_0 - 1} \left(1 - \frac{x - \theta_4}{\theta_3} \right)^{\theta_1 - 1} \left/ \left[1 + (\theta_2 - 1) \frac{x - \theta_4}{\theta_3} \right]^{\theta_0 + \theta_1} \right.,$$

представленные в таблице 1 в виде $B_{III}(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ при конкретных значениях параметров.

ТАБЛИЦА 1. МОДЕЛИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СТАТИСТИКИ $S_{\max}^{Sm}$

k	Модель
2	$K(S)$
3	$B_{III}(6.3274, 6.6162, 2.8238, 2.4073, 0.4100)$
4	$B_{III}(7.2729, 7.2061, 2.6170, 2.3775, 0.4740)$
5	$B_{III}(7.1318, 7.3365, 2.4813, 2.3353, 0.5630)$
6	$B_{III}(7.0755, 8.0449, 2.3163, 2.3818, 0.6320)$
7	$B_{III}(7.7347, 8.6845, 2.3492, 2.4479, 0.6675)$
8	$B_{III}(7.8162, 8.9073, 2.2688, 2.4161, 0.7120)$
9	$B_{III}(7.8436, 8.8805, 2.1696, 2.3309, 0.7500)$
10	$B_{III}(7.8756, 8.9051, 2.1977, 2.3280, 0.7900)$
11	$B_{III}(7.9122, 9.0411, 2.1173, 2.2860, 0.8200)$

В k -выборочном критерии максимума Лемана–Розенблатта в качестве $S_{i,j}$ используется статистика соответствующего двухвыборочного критерия, предложенного в работе [18], в форме [3]

$$T = \frac{1}{(n_1 + n_2)} \left[n_2 \sum_{i=1}^{n_2} (r_i - i)^2 + n_1 \sum_{j=1}^{n_1} (s_j - j)^2 \right] - \frac{4n_1 n_2 - 1}{6(n_1 + n_2)},$$

где r_i – порядковый номер (ранг) x_{2i} ; s_j – порядковый номер (ранг) x_{1j} в объединенном вариационном ряде. В [19] было показано, что статистика T в пределе распределена как $a1(t)$ [3].

Соответствующую статистику критерия максимума Лемана–Розенблатта обозначим как $S_{\max}^{LR}$.

Построенные в [24] модели асимптотических (предельных) распределений статистики $S_{\max}^{LR}$ при числе сравниваемых выборок $k = 3 \div 11$ представлены в таблице 2. В данном случае наилучшими моделями оказались распределения Sb–Джонсона с плотностью

$$f(x) = \frac{\theta_1 \theta_2}{\sqrt{2\pi}(x - \theta_3)(\theta_2 + \theta_3 - x)} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\theta_0 - \theta_1 \ln \frac{x - \theta_3}{\theta_2 + \theta_3 - x} \right]^2 \right\}$$

при конкретных значениях параметров этого закона, обозначенного в таблице 3 как $Sb(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$. Представленные модели позволяют по значениям статистики $S_{\max}^{LR}$ при соответствующем числе k сравниваемых выборок находить оценки p_{value} .

ТАБЛИЦА 2. МОДЕЛИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СТАТИСТИКИ $S_{\max}^{LR}$

k	Модель
2	$a1(t)$
3	$Sb(3.2854, 1.2036, 3.0000, 0.0215)$
4	$Sb(2.5801, 1.2167, 2.2367, 0.0356)$
5	$Sb(3.1719, 1.4134, 3.1500, 0.0320)$
6	$Sb(2.9979, 1.4768, 2.9850, 0.0380)$
7	$Sb(3.2030, 1.5526, 3.4050, 0.0450)$

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 2. МОДЕЛИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СТАТИСТИКИ $S_{\max}^{LR}$

k	Модель
8	$Sb(3.2671, 1.6302, 3.5522, 0.0470)$
9	$Sb(3.4548, 1.7127, 3.8800, 0.0490)$
10	$Sb(3.4887, 1.7729, 3.9680, 0.0510)$
11	$Sb(3.4627, 1.8168, 3.9680, 0.0544)$

В критерии максимума Андерсона–Дарлинга в качестве $S_{i,j}$ используется статистика двухвыборочного критерия Андерсона–Дарлинга, предложенная в [20] и определяемая выражением

$$A^2 = \frac{1}{n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1 + n_2 - 1} \frac{(M_i(n_1 + n_2) - n_1 i)^2}{i(n_1 + n_2 - i)},$$

где M_i – число элементов первой выборки, меньших или равных i -му элементу вариационного ряда объединенной выборки. Предельным распределением статистики A^2 при справедливости проверяемой гипотезы H_0 является распределение $a2(t)$ [3].

Соответствующую статистику k -выборочного критерия максимума Андерсона–Дарлинга обозначим как $S_{\max}^{AD}$.

Построенные в [24] модели асимптотических (предельных) распределений статистики $S_{\max}^{AD}$ при числе сравниваемых выборок $k = 3 \div 11$ представлены в таблице 3. В этом случае лучшими моделями также оказались бетараспределения 3-го рода $B_{III}(\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)$ с конкретными значениями параметров.

ТАБЛИЦА 3. МОДЕЛИ ПРЕДЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СТАТИСТИКИ $S_{\max}^{AD}$

k	Модель
2	$a2(t)$
3	$B_{III}(4.4325, 2.7425, 12.1134, 8.500, 0.1850)$
4	$B_{III}(5.2036, 3.2160, 10.7792, 10.000, 0.2320)$
5	$B_{III}(5.7527, 3.3017, 9.7365, 10.000, 0.3000)$
6	$B_{III}(5.5739, 3.4939, 7.7710, 10.000, 0.3750)$
7	$B_{III}(6.4892, 3.6656, 8.0529, 10.500, 0.3920)$
8	$B_{III}(6.3877, 3.8143, 7.3602, 10.800, 0.4800)$
9	$B_{III}(6.7910, 3.9858, 7.1280, 11.100, 0.5150)$
10	$B_{III}(6.7533, 4.2779, 6.6457, 11.700, 0.5800)$
11	$B_{III}(7.1745, 4.3469, 6.6161, 11.800, 0.6100)$

Д. Критерий однородности χ^2

Для анализа $k \geq 2$ выборок с успехом может использоваться критерий однородности χ^2 . В этом случае общая область, которой принадлежат выборки, разбивается на r интервалов (групп). Пусть η_{ij} – количество элементов i -й

выборки, попавших в j -й интервал, тогда $n_i = \sum_{j=1}^r \eta_{ij}$.

Статистика критерия однородности χ^2 имеет вид

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{(\eta_{ij} - v_j n_i / n)^2}{v_j n_i} = n \left(\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^r \frac{\eta_{ij}^2}{v_j n_i} - 1 \right),$$

где $v_j = \sum_{i=1}^k \eta_{ij}$ – общее число элементов всех выборок, попавших j -й интервал. Асимптотическим распределением статистики является χ^2 -распределение с числом степеней свободы $(k-1)(r-1)$ [25].

Недостатком критерия является зависимость мощности от выбора числа интервалов и способа разбиения на интервалы.

Е. Сравнительный анализ мощности критериев

Мощность k -выборочных критериев исследовалась при разных k относительно различных конкурирующих гипотез.

Кратко результаты исследований можно охарактеризовать следующим образом.

Относительно конкурирующих гипотез, связанных с изменением параметра сдвига у закона распределения одной из выборок, критерии можно упорядочить по мощности следующим образом:

$$S_{\max}^{AD} \succ AD \succ S_{\max}^{LR} \succ S_{\max}^{Sm} \succ Z_C \succ Z_A \succ Z_K \succ \chi^2.$$

Относительно конкурирующих гипотез, связанных с изменением параметра масштаба у закона распределения одной из выборок, –

$$Z_C \succ Z_A \succ Z_K \succ AD \succ \chi^2 \succ S_{\max}^{AD} \succ S_{\max}^{Sm} \succ S_{\max}^{LR}.$$

Можно отметить, что с ростом количества сравниваемых выборок тех же объёмов мощность критерия относительно аналогичных конкурирующих гипотез, как правило, снижается.

Отметим также, что критерии Жанга со статистиками Z_K , Z_A , Z_C относительно некоторых альтернатив обладают заметным преимуществом в мощности.

VIII. КРИТЕРИИ ОДНОРОДНОСТИ СРЕДНИХ

К критериям проверки гипотез об однородности математических ожиданий (об однородности средних) прибегают при контроле средств измерений, при статистическом анализе результатов экспериментов, при статистическом управлении качеством для проверки наличия возмущения в ходе процесса.

В общем случае проверяемая гипотеза о равенстве математических ожиданий, соответствующих k выборкам, имеет вид

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k$$

при конкурирующей гипотезе

$$H_1: \mu_{i_1} \neq \mu_{i_2}$$

где неравенство выполняется хотя бы для одной пары индексов i_1, i_2 .

Для проверки гипотезы H_0 может использоваться ряд параметрических критериев: сравнения двух выборочных средних при известных дисперсиях; сравнения двух выборочных средних при неизвестных, но равных дисперсиях (критерий Стьюдента); сравнения двух выборочных средних при неизвестных и неравных дисперсиях; F -критерий. В этих же целях применяется целая совокупность непараметрических критериев: критерий Уилкоксона, критерий Манна–Уитни, критерий Краскела–Уаллиса, критерий Ван дер Вардена, k -выборочный критерий Ван дер Вардена.

Основным предположением, обуславливающим возможность применения параметрических критериев, является принадлежность анализируемых выборок нормальному закону. Непараметрические критерии свободны от этого требования.

Результаты исследований, сконцентрированные в [21], подтвердили устойчивость параметрических критериев проверки однородности математических ожиданий. Если законы распределения анализируемых выборок отличаются от нормального, но нет оснований полагать, что выборки принадлежат законам с «тяжелыми хвостами» или существенно асимметричным, то применение классических параметрических критериев остаётся корректным и не приводит к серьёзным ошибкам при оценке p_{value} .

Многовыборочный критерий Ван дер Вардена практически не уступает в мощности своему параметрическому аналогу F -критерию. Недостатком непараметрических критериев Манна–Уитни и Краскела–Уаллиса является существенная дискретность распределений статистик. В то же время оба эти критерия не столь уж сильно уступают в мощности параметрическим критериям.

IX. КРИТЕРИИ ОДНОРОДНОСТИ СРЕДНИХ

Критерии проверки однородности дисперсий очень широко используются в различных приложениях, но неоправданно редко в задачах метрологии.

В критериях проверки однородности дисперсий проверяемая гипотеза о постоянстве дисперсий k выборок имеет вид

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2.$$

а конкурирующая с ней –

$$H_1: \sigma_{i_1}^2 \neq \sigma_{i_2}^2,$$

где неравенство выполняется, по крайней мере, для одной пары индексов i_1, i_2 .

В данном случае мы имеем очень представительное множество параметрических критериев (Бартлетта, Кокрена, Хартли, Левене, Фишера, Неймана–Пирсона, О’Брайена, Линка, Ньюмана, Блиса–Кокрена–Тьюки, Кадзулла–Лесли–Брауна, Оверолла–Вудворда, Миллера, Лайарда) и ряд непараметрических критериев (Ансари–Бредли, Муда, Сижела–Тьюки, Клотца, Кейпена, Флайне–Киллина). Одним из основных предположений при построении параметрических критериев является принадлежность анализируемых выборок нормальному закону распределения. Как правило, параметрические критерии чрезвычайно

чувствительны к малейшим нарушениям этого предположения. Именно попытками построения устойчивых к нарушению стандартного предположения о нормальности объясняется большой выбор параметрических критериев. Нельзя не отметить, что повышение устойчивости критерия практически всегда сопровождается некоторой потерей в мощности.

Непараметрические аналоги предназначены для проверки гипотез об однородности параметров масштаба законов. Корректность применения непараметрических критериев обусловлена не менее жесткими предположениями. Во-первых, предполагается, что анализируемые выборки принадлежат одному и тому же закону распределения. В противном случае даже при справедливости проверяемой гипотезы H_0 о равенстве дисперсий распределения статистик этих критериев будут отличаться от имеющих место при выполнении данного предположения. Во-вторых, предполагается равенство математических ожиданий.

Результаты наших исследований свойств критериев проверки гипотез об однородности дисперсий, сконцентрированные в [21], кратко можно охарактеризовать следующим образом.

При $k = 2$ и выполнения предположения о нормальности наиболее предпочтительна по мощности группа эквивалентных критериев Бартлетта, Кокрена, Хартли, Фишера, Неймана–Пирсона и.

Другую группу практически эквивалентных по мощности критериев образуют критерии Лайарда, Миллера, О’Брайена и модифицированный критерий Оверолла–Вудворда. При этом эта группа имеет преимущество в мощности по сравнению с критерием Левене. Считается, что, как и последний, критерии О’Брайена и модифицированный критерий Оверолла–Вудворда достаточно устойчивы к нарушению стандартного предположения о нормальности.

Непараметрические критерии существенно уступают в мощности вышеперечисленным параметрическим, но, как правило, превосходят в мощности параметрические критерии Ньюмана, Блисса–Кокрена–Тьюки, Кадуэлла–Лесли–Брауна и Линка. В группе непараметрических критериев результаты анализа показывают заметное преимущество в мощности критерия Клотца. Затем следуют критерии Флайне–Киллина и критерий Муда. Ещё меньшую мощность и практическую эквивалентность демонстрируют критерии Ансари–Бредли и Сижела–Тьюки.

При $k > 2$ критерии Бартлетта, Кокрена, Хартли, Неймана–Пирсона и критерий Оверолла–Вудворда уже не образуют группу эквивалентных критериев с одинаковой мощностью. Исключение составляют лишь критерии Бартлетта и Неймана–Пирсона, которые остаются практически эквивалентными, а также пара критериев Миллера и Лайарда. На первой позиции с явным преимуществом оказывается критерий Кокрена.

Применению параметрических критериев в нестандартных ситуациях при законах отличных от нормального препятствует то, что распределения статистик критериев при справедливости H_0 оказываются неизвестными. Но это не исключает возможности их применения при использовании компьютерных технологий для исследования распределений статистик в интерактивном режиме.

В случае принадлежности выборок симметричному закону с “хвостами”, более легкими, чем у нормального закона, преимущество в мощности сохраняется за параметрическими критериями, и критерии упорядочиваются по практически так же, как и при нормальном законе.

При симметричных законах с более тяжелыми “хвостами” по сравнению с нормальным законом порядок предпочтения меняется, и при $k = 2$ критерии располагаются следующим образом:

Флайне–Киллина > Клотца > Муда > Левене > Сижела–Тьюки ~ Ансари–Бредли > Миллера > О’Брайена > Лайарда > Модифицированный Оверолла–Вудворда > группа критериев (Бартлетта, Кокрена, Хартли, Фишера, Неймана–Пирсона, Оверолла–Вудворда) > Ньюмана > группа критериев (Блисса–Кокрена–Тьюки, Кадуэлла–Лесли–Брауна, Линка)

В той же ситуации, но при $k > 2$, когда могут применяться не все критерии, имеем следующую упорядоченность:

Флайне–Киллина > Левене > О’Брайена > Лайарда > Модифицированный Оверолла–Вудворда > Миллера > Бартлетта ~ Неймана–Пирсона > Оверолла–Вудворда > Хартли > Кокрена > Кадуэлла–Лесли–Брауна > Блисса–Кокрена–Тьюки.

В системе [2] реализована возможность применения параметрических критериев проверки гипотез об однородности дисперсий при законах распределения, отличающихся от нормального, но известных. Информация о предполагаемом законе может быть следствием предшествующих исследований. Она может быть получена также в результате идентификации закона по выборке, полученной объединением анализируемых.

Более полная информация о достоинствах и недостатках конкретных критериев представлена в [21].

Х. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Очевидно, что в задачах метрологического обеспечения измерительных процессов используется далеко не полный спектр эффективных статистических методов, способных оказать положительное влияние на качество этого обеспечения. Осознание этого факта и знание реальных свойств множества статистических критериев должно способствовать прогрессу в решении задач, стоящих перед метрологами.

Далеко не последняя роль в разрешении множества проблем, препятствующих эффективному использованию статистических критериев, в том числе в задачах метрологии, принадлежит компьютерным технологиям исследований и программному обеспечению.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственной работы «Обеспечение проведения научных исследований» (№ 1.4574.2017/6.7) и проектной части государственного задания (№ 1.1009.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Постовалов С.Н., Чимитова Е.В. Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: Монография. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. 888 с.
- [2] ISW–Программная система статистического анализа одномерных наблюдений. <https://ami.nstu.ru/~headrd/ISW.htm>. (дата обр. 06.08.2018)
- [3] Большев Л.Н. Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М. : Наука, 1983. 416 с.
- [4] Stephens M. A. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons // J. Am. Statist. Assoc. 1974. Vol. 69. No. 347. pp. 730–737.
- [5] Лемешко Б.Ю. Непараметрические критерии согласия: Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2014. 163 с.
- [6] Zhang J. Powerful goodness-of-fit tests based on the likelihood ratio // Journal of the Royal Statistical Society: Series B. 2002. V. 64. № 2. pp. 281–294.
- [7] M. Kac, J. Kiefer, J. Wolfowitz. On tests of normality and other tests of goodness of fit based on distance methods // Ann. Math. Stat. 1955. Vol. 26. pp. 189–211.
- [8] Никулин М.С. О критерии хи-квадрат для непрерывных распределений // Теория вероятностей и ее применение. 1973. Т. XVIII. № 3. С. 675–676.
- [9] Rao K.C., Robson D.S. A chi-squared statistic for goodness-of-fit tests within the exponential family // Commun. Statist. 1974. Vol. 3. pp. 1139–1153.
- [10] ГОСТ Р ИСО 5479–2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. – М. : Изд-во стандартов, 2002. 30 с.
- [11] Лемешко Б.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2015. 160 с.
- [12] Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2015. 183 с.
- [13] Kiefer J. K-Sample Analogues of the Kolmogorov-Smirnov and Cramer-v. Mises Tests // Annals of Mathematical Statistics. 1959. Vol. 30. No. 2. pp. 420–447.
- [14] Conover W.J. Several k-sample Kolmogorov-Smirnov tests // The Annals of Mathematical Statistics. 1965. Vol. 36, No. 3. pp.1019–1026.
- [15] Conover W.J. Practical Nonparametric Statistics. 3d ed. Wiley, 1999. 584 p.
- [16] Scholz F.W., Stephens M.A. K-Sample Anderson–Darling Tests // Journal of the American Statistical Association. 1987. Vol. 82. No. 399. pp. 918–924.
- [17] Zhang J., Wu Y. k-Sample tests based on the likelihood ratio // Computational Statistics & Data Analysis. 2007. V. 51. No. 9. pp. 4682–4691.
- [18] Lehmann E.L. Consistency and unbiasedness of certain nonparametric tests // Ann. Math. Statist. 1951. Vol. 22, № 1. pp. 165–179.
- [19] Rosenblatt M. Limit theorems associated with variants of the von Mises statistic // Ann. Math. Statist. 1952. Vol. 23. pp. 617–623.
- [20] Pettitt A.N. A two-sample Anderson-Darling rank statistic // Biometrika. 1976. Vol. 63. No. 1. pp. 161–168.
- [21] Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению : монография. – М. : ИНФРА-М, 2017. 208 с.
- [22] Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В. О применении критериев проверки однородности законов распределения // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 41. С. 24–31.
- [23] Lemesheko B.Yu., Lemesheko S.B. Statistical distribution convergence and homogeneity test power for Smirnov and Lehmann–Rosenblatt tests // Measurement Techniques, 2005. V. 48, № 12. pp. 1159–1166.
- [24] Лемешко Б.Ю., Веретельникова И.В. Мощность k-выборочных критериев проверки однородности законов // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 3–7.
- [25] Крамер Г. Математические методы статистики. – М.: Мир, 1975. 648 с.

Обобщенные модели данных в измерительных задачах. Спектральные и временные представления

Т. Н. Сирая

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
197046, С.-Петербург, Россия
tnsiraya@gmail.com

Аннотация — Поскольку классические стационарные модели и спектральные представления данных недостаточны для решения задач обработки данных при измерениях, рассматриваются пути расширения моделей данных на основе обобщенных спектральных и временных представлений случайных процессов.

В первой группе выделены гармонизируемые процессы и процессы со стационарными приращениями, которые существенно расширяют множество стационарных процессов, но допускают спектральные представления. В группе временных представлений рассмотрены общие разложения по инновационным процессам, которые могут иметь произвольные спектральные типы и кратности. Отмечено, что используемые на практике одномерные случайные процессы имеют кратность 1.

Ключевые слова — случайный процесс, стационарный процесс, спектральное представление, представление во временной области, нестационарный процесс, гармонизируемый процесс, процесс со стационарными приращениями, каноническое разложение, инновационный процесс, спектральная кратность

I. ВВЕДЕНИЕ

Стационарные модели данных обычно используются в измерительной практике, и основу их практического применения составляют два вида интегральных разложений: спектральные представления и разложения во временной области [1, 2].

Поскольку стационарные модели недостаточны для решения современных задач обработки данных при измерениях, необходимо использовать различные расширения моделей, которые целесообразно строить на основе обобщения спектральных и временных представлений.

С одной стороны, в теории случайных процессов предлагаются некоторые виды обобщенных спектральных представлений [2], которые имеют различные области применения и дают различный аппарат для решения задач обработки данных при измерениях. Поэтому целесообразно исследовать возможности использования обобщенных спектральных моделей для решения измерительных задач.

С другой стороны, разработаны различные временные представления процессов [3], в том числе, достаточно общего и сложного вида. На их основе также можно развивать методы, полезные для решения измерительных задач. Однако для их эффективного использования необходимо выделить практически значимые случаи.

В данной работе спектральные и временные представления данных сопоставляются в нескольких аспектах, включая области применения и возможности использования для решения измерительных задач, а также трудоемкость построения таких представлений на практике.

II. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ СТАЦИОНАРНЫХ И ПОДОБНЫХ ИМ ПРОЦЕССОВ

A. Стационарные и гармонизируемые процессы

Традиционно при исследовании сигналов и погрешностей принимают предположение об определенной стабильности исследуемых явлений. Это выражается в модели стационарного процесса $X(t)$, который характеризуется постоянным математическим ожиданием и корреляционной функцией, не зависящей от сдвига времени: $R(s, t) = R(s-t)$.

Для него имеется спектральное представление [1]:

$$X(t) = \int \exp(it\lambda) dZ(\lambda), \quad (1)$$

где $Z(\lambda)$ – случайная функция с некоррелированными приращениями, $E |dZ(\lambda)|^2 = f(\lambda) d\lambda$.

Основной характеристикой стационарного процесса является спектральная плотность $f(\lambda)$, которая полностью определяет корреляционную функцию процесса:

$$R(t) = \int \exp(it\lambda) f(\lambda) d\lambda. \quad (2)$$

Учитывая ограниченность стационарной модели и привлекательность спектральных методов анализа, стремятся к расширениям моделей на основе обобщенных спектральных представлений.

В этом направлении, прежде всего, получается класс гармонизируемых процессов, которые определяются условием (1), но без введения требования о некоррелированных приращениях процесса $Z(\lambda)$ [2, 5].

В этом случае для корреляционной функции вместо спектрального представления (2) получается более общее спектральное представление, с использованием двумерной спектральной плотности:

$$R(s, t) = \int \exp[i(t\lambda - s\mu)] f(\lambda, \mu) d\lambda d\mu. \quad (3)$$

где $E (dZ(\lambda) dZ(\mu)) = f(\lambda, \mu) d\lambda d\mu$.

К сожалению, в связи с двумерной спектральной плотностью общее разложение вида (3) обычно гораздо труднее построить по экспериментальным данным и сложнее использовать на практике, чем классическое представление вида (2).

Представления вида (3) могут быть полезны при анализе процессов, близких к стационарным, или полученных при их преобразованиях. Но в целом область их использования (без использования дополнительной информации) оказывается довольно ограниченной, и потому они не получили широкого применения в измерительной практике.

В. Процессы со стационарными приращениями

Отклонения реальных процессов от стационарной модели могут иметь различный характер, но нередко стационарный характер могут иметь их приращения; например, это верно для винеровского процесса. Поэтому для измерительной практики перспективна модель процесса со стационарными приращениями [2].

Случайный процесс $X(t)$, $-\infty < t < \infty$, называется процессом со стационарными приращениями [2], если его приращения имеют математические ожидания линейного вида:

$$E(X(s) - X(t)) = a(s - t),$$

и его структурная функция (ковариация приращений процесса) не зависит от сдвига времени:

$$E(X(u) - X(t))(X(s) - X(t)) = D(u - t, s - t).$$

Таким образом, случайный процесс со стационарными приращениями (СПСтП) определяется структурной функцией от двух переменных

$$D(\tau_1, \tau_2) = E(X(t + \tau_1) - X(t))(X(t + \tau_2) - X(t)).$$

Более того, для вещественного процесса достаточно задавать структурную функцию одной переменной:

$$D_0(\tau) = E(X(t + \tau) - X(t))^2. \quad (4)$$

Процесс со стационарными приращениями имеет спектральное представление вида

$$X(t) = \int [\exp(it\lambda) - 1] / (i\lambda) dZ(\lambda) + X_0 \quad (5)$$

где $Z(\lambda)$ – случайная функция с некоррелированными приращениями.

Множество СПСтП существенно шире, чем множество стационарных процессов; оно содержит, в частности, винеровский процесс, а также ряд других практически важных нестационарных процессов.

При этом структурная функция СПСтП также имеет спектральное представление, аналогичное классическому разложению (2):

$$D(\tau, \mu) = \int ((\exp(i\lambda\tau) - 1)(\exp(i\lambda\mu) - 1) / \lambda^2) dF(\lambda),$$

где $F(\lambda)$ – возрастающая спектральная функция, $dF(\lambda) = E |dZ(\lambda)|^2$.

Как и выше, для вещественного процесса такое представление принимает более простой вид:

$$D_0(\tau) = 2 \int [(1 - \cos \tau\lambda) / \lambda^2] dF(\lambda). \quad (6)$$

Спектральная функция $F(\lambda)$ является ограниченной только в случае дифференцируемого процесса; в общем случае она удовлетворяет более слабым условиям: при всех $a > 0$ конечны интегралы вида

$$\int_a^\infty dF(\lambda) / \lambda^2 < \infty, \quad \int_{-\infty}^{-a} dF(\lambda) / \lambda^2 < \infty. \quad (7)$$

Введенный класс процессов имеет простой и наглядный физический смысл: случайные процессы со стационарными приращениями описывают физические явления и процессы, которые характеризуются стационарным механизмом развития (хотя сами не обязательно являются стационарными).

Этот класс процессов был введен в работах А. М. Яглома [2] и успешно применялся при исследованиях процессов турбулентности в атмосфере и океане [2, 6].

Можно продолжить расширения класса процессов и далее: аналогичным образом определяются и процессы со стационарными приращениями порядка n . Для них структурная функция вида (4) определяется через n -е приращение процесса, и для нее также имеется спектральное представление, обобщающее (6).

С другой стороны, некоторые из таких процессов могут быть получены из стационарных процессов как предельные случаи. В качестве простейшего примера можно отметить модель гармонического осциллятора.

Пример 1. Колебания гармонического осциллятора

Координаты простого гармонического осциллятора $X(t)$ описываются стационарным процессом со спектральной плотностью вида:

$$f(\lambda) = c / (\lambda^2 + a^2),$$

где a – постоянная, зависящая от жесткости пружины.

Если параметр $a \rightarrow 0$, то спектральная плотность имеет предел: $f(\lambda) \rightarrow c / \lambda^2$, поэтому непосредственный предельный переход случайных процессов в точке 0 оказывается некорректным.

Однако приращение процесса относительно точки 0

$$X(t) - X(0) = \int [\exp(it\lambda) - 1] dZ(\lambda)$$

сходится к определенному пределу. Полученный процесс оказывается Винеровским процессом, который является нестационарным, но имеет стационарные приращения.

На основе спектральных представлений для процессов со стационарными приращениями (разумеется, с соответствующими модификациями) в принципе, можно распространить также основные методы обработки данных, разработанные для стационарных процессов. Однако, по сравнению со стационарными процессами, при этом изменяются основные оцениваемые характеристики:

– математические ожидания приращений, которые задаются линейной функцией: $E(X(s) - X(t)) = a(s - t)$,

– структурные функции вида $D(\tau, \mu)$ или $D_0(\tau)$.

Поэтому, кроме существенного расширения области применения спектральных методов, здесь открываются и принципиально новые возможности проведения анализа данных, с использованием новых характеристик данных, например, основанных на структурной функции $D(\tau, \mu)$ или $D_0(\tau)$.

В целом, такие расширения моделей физически наглядны и представляются перспективными для использования в измерительных задачах. Более того, оказывается, что в неявном виде такие модели уже давно используются в измерительной практике – например, в форме широко распространенной в настоящее время характеристики рассеивания данных – вариации Аллана.

Пример 2.

Статистическая интерпретация вариации Аллана

В настоящее время во многих измерительных задачах актуальна такая характеристика, как вариация Аллана [7]:

$$\sigma_a^2(\tau) = \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1}(\tau) - x_k(\tau))^2 / 2(n-1), \quad (8)$$

где $x_k(\tau)$ – получается в результате усреднения сигнала $x(t)$ на интервале $(t_0 + k\tau, t_0 + (k+1)\tau)$, $k = 1 \dots n$.

Первоначально вариация Аллана была введена как характеристика нестабильности эталонов времени и частоты, но применяется и в других областях измерений, например, для эталонов электрических величин, и как важная характеристика навигационных устройств. Особенно полезной вариация Аллана оказывается в случае нестационарных сигналов, в том числе, белых и $1/f$ – шумов, винеровских процессов, когда обычная дисперсия неприменима.

Однако в ряде случаев ее интерпретация оказывается не вполне однозначной. Отчасти это обусловлено тем, что вариация Аллана была введена как эмпирическая характеристика – без указания параметра масштаба, который оценивается, и без определения исходной модели данных.

Оказывается, что в рамках модели процессов со стационарными приращениями вариация Аллана получает определенную статистическую интерпретацию [8], а именно – является оценкой структурной функции (4).

Это показывает, что вариация Аллана является принципиально другой характеристикой, чем дисперсия; а также объясняет то, что ее использование оказывается более эффективным для случая нестационарных процессов, чем для стационарных [7].

При такой интерпретации, из спектрального представления для структурной функции $D_0(\tau)$ получается также спектральное представление для математического ожидания вариации Аллана.

Из этого также следует, что вариация Аллана $\sigma_a^2(\tau)$ – не просто альтернативная оценка дисперсии, а оказывается принципиально другой масштабной характеристикой погрешности, нежели классическая дисперсия S^2 . Это открывает возможности совместного использования двух указанных характеристик при обработке данных и контроле параметров измерительных устройств.

III. ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

A. Канонические представления

В теории процессов разрабатывают также различные представления процессов во временной области [3], которые также полезно использовать на практике. Такие представления являются обобщениями классического временного представления для недетерминированного одномерного стационарного процесса [1]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^t g(t-u) dz(u), \quad (9)$$

где $z(t)$ – процесс с ортогональными приращениями и лебеговской спектральной мерой: $dF(u) = E |dz(u)|^2 = du$.

Наиболее общие представления во временной области (так называемые, инновационные или канонические представления) получены для недетерминированных процессов второго порядка.

Такие процессы рассматриваются как кривые в гильбертовом пространстве случайных величин с конечной дисперсией [3]:

$$H = \{x: E|x|^2 < \infty\}, \quad (10)$$

со скалярным произведением $(x, y) = E(x, \bar{y})$.

В общем случае недетерминированного процесса второго порядка также имеется каноническое представление, аналогичное (9), однако, к сожалению, оно оказывается значительно сложнее и представляет собой сумму M интегралов от инновационных процессов:

$$x(t) = \sum_{n=1}^M \int_{-\infty}^t g_n(t, u) dz_n(u), \quad (11)$$

где $z_n(t)$ – взаимно ортогональные (инновационные) процессы с ортогональными приращениями, при этом соответствующие им спектральные меры упорядочены:

$$dF_1 > dF_2 > \dots;$$

M – спектральная кратность процесса, $1 \leq M \leq \infty$.

При этом подпространство $H(x, t)$, порожденное значениями процесса $x(s)$, $s \leq t$, представимо как прямая сумма подпространств $H(z_n, t)$, порождаемых инновационными процессами:

$$H(x, t) = \sum_{n=1}^M H_n(z_n, t), \quad (12)$$

Отметим, что для векторных стационарных процессов имеет место представление, аналогичное (9), но его спектральная кратность M может быть больше 1 и совпадает с рангом процесса [1].

Приведенные канонические представления были бы очень удобны для решения некоторых задач обработки данных, поскольку фильтрация и прогнозирование процессов сводится к проектированию на соответствующие подпространства в гильбертовом пространстве H . Однако, на практике построение такого представления довольно трудоемко и требует значительной дополнительной информации о процессе.

В. Процессы кратности $M = 1$

Спектральная кратность процесса M может быть любой, от 1 до ∞ (включительно); но для практики, разумеется, наибольший интерес представляют процессы кратности $M=1$, то есть, вида

$$x(t) = \int_{-\infty}^t g(t, u) dz(u). \quad (13)$$

Это представление отличается от классического выражения (9) для стационарного процесса тем, что ядро $g(t, u)$ двумерно, а спектральная мера процесса $dF(u) = E |dz(u)|^2$ может быть произвольной.

Возникает вопрос: насколько часто на практике нарушается такое представление, то есть, приходится использовать общие представления кратности $M > 1$?

Однозначного и полного критерия кратности $M = 1$ до сих пор неизвестно. Однако все известные примеры одномерных процессов, обладающих кратностью $M > 1$, имеют весьма искусственный характер [3, 9] и вряд ли представляют практический интерес.

Это также подтверждается простым критерием, позволяющим проследить изменение кратности при суммировании двух или более процессов кратности $M=1$ [10].

Наконец, в работе [11] показано, что при выполнении довольно простых условий регулярности процесс имеет кратность $M = 1$.

Таким образом, можно сделать вывод, что используемые на практике процессы имеют кратность 1, то есть, представимы в виде (13).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный анализ двух классов интегральных представлений нестационарных случайных процессов - спектральных и временных – показывает:

1 Указанные две группы представлений, которые являются обобщениями классических представлений стационарных процессов, взаимно дополняют друг и друга и в целом перспективны для использования при решении измерительных задач.

2 Наиболее перспективно использование процессов со стационарными приращениями, которые существенно расширяют множество стационарных процессов, но имеют спектральные представления.

В указанном классе моделей возможно не только развитие методов обработки данных (на основе спектральных представлений), но и введение новых характеристик данных, в том числе, статистическое обоснование актуальной эмпирической характеристики – вариации Аллана.

3 Наиболее широким обобщением являются инновационные (канонические) представления недетерминированных процессов во временной области.

Они могут иметь любую кратность: $1 \leq M \leq \infty$; однако практически значимые одномерные процессы имеют кратность 1.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гихман И. И., Скороход А. В. *Введение в теорию случайных процессов*. М.: Физматгиз, 1977.
- [2] Yaglom A. M. *Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions*. Vol. 1, 2. Springer-Verlag, New York, 1987.
- [3] Cramer H. *Stochastic processes as curves in Hilbert space*. Теория вероятностей и ее применения. Т. 9 (2), pp. 169-179, 1964.
- [4] Cramer H., Leadbetter M. R. *Stationary and Related Stochastic Processes*. J Wiley & Sons, New York. 1967.
- [5] Priestley M. B. *Spectral Analysis and Time Series*. Academic Press, 1981.
- [6] Monin A. S., Yaglom A. M. *Statistical Fluid Mechanics*. – Vol. 1. Cambridge, Mass., USA: MIT Press, 1971.
- [7] Allan D. W. Should the classical variance be used as a basic measure in standards metrology? *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, **IM-36**, pp. 646-654. 1987.
- [8] Siraya T. N. Stationary increment random functions as a basic model for Allan variance. / Intern. Conf. "Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and testing XI", Book of Abstracts, pp. 7-8. 2017.
- [9] Hitsuda M. Multiplicity of some classes of Gaussian processes. *Nagoya Mathem. Journal*, **52**, pp. 39-46. 1973.
- [10] Сиря Т. Н. О канонических представлениях процессов кратностей 1 и 2. Теория вероятностей и ее применения. Т. 18 (1), pp. 155-160, 1973.
- [11] Cramer H. *Structural and statistical problems for a class of stochastic processes*. Wilk memorial lecture, Princeton. 1971.

Метрологический подход к обоснованию вариации Аллана как характеристики рассеяния данных

Т. Н. Сирая

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30
tnsiraya@gmail.com

Аннотация — В настоящее время вариация Аллана широко используется во многих областях измерений и точного приборостроения как характеристика рассеивания данных. Однако в методическом плане остается ряд вопросов, связанных с обоснованием вариации Аллана, решение которых было бы полезно для развития ее теории и приложений. В докладе излагается метрологический подход к обоснованию вариации Аллана как характеристики рассеивания данных.

В качестве исходной модели предложено использовать процессы со стационарными приращениями, которые существенно расширяют множество стационарных процессов и допускают спектральные представления. Показано, что в рамках расширенной модели вариация Аллана является эмпирической оценкой структурной функции процесса со стационарными приращениями. Это позволяет уточнить ее интерпретацию и использовать для нее спектральное представление.

Ключевые слова — случайный процесс; вариация Аллана; характеристика рассеивания; дисперсия; процесс со стационарными приращениями; структурная функция; спектральное представление

I. ВВЕДЕНИЕ

В докладе излагается метрологический подход к обоснованию вариации Аллана [1] как характеристики рассеивания данных, которая в настоящее время широко используется во многих областях измерений и точного приборостроения.

Вариация Аллана [1] определяется через разности последовательных средних значений сигнала на заданных интервалах:

$$\sigma_a^2(\tau) = \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1}(\tau) - x_k(\tau))^2 / 2(n-1), \quad (1)$$

где $x_k(\tau)$ — получается в результате усреднения сигнала $x(t)$ на интервале $(t_0 + k\tau, t_0 + (k+1)\tau)$, $k = 1 \dots n$.

Первоначально вариация Аллана была введена как характеристика нестабильности эталонов времени и частоты [1], но применяется и в других областях измерений [2], например, для эталонов электрических величин [3], и как важная характеристика навигационных устройств [4]. Особенно полезной вариация Аллана оказывается в случае нестационарных сигналов, в том числе, белых и $1/f$ — шумов, винеровских процессов, когда обычная дисперсия оказывается неприменимой.

Однако в методическом плане остается ряд вопросов, решение которых было бы полезно для развития теории и приложений вариации Аллана. Это связано с тем, что вариация Аллана была введена «феноменологически» — как эмпирическая оценка рассеивания данных [1, 2], минуя формальное определение исходной модели данных и параметра модели, оценкой которого она является.

В то же время, в метрологии [5, 6] и прикладной статистике принят определенный подход к определению показателей погрешностей: сначала формируют модель данных и вводят масштабный параметр, а затем определяют эмпирическую оценку параметра. Очевидно, выявление модели и масштабного параметра позволило бы полнее исследовать свойства и возможности применения вариации Аллана, а также ее взаимосвязи с другими оценками рассеивания, прежде всего — дисперсией.

В данной работе предлагается использовать указанный метрологический подход; при этом в качестве исходной вероятностной модели рассматривается множество случайных процессов со стационарными приращениями [7]. В рамках такой модели вариация Аллана (далее — ВА) получает естественную статистическую интерпретацию как оценка параметра масштаба.

II. ОБЩАЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОГРЕШНОСТЕЙ

Традиционную метрологическую схему определения характеристик погрешностей можно кратко представить следующим образом [5, 6]:

- Выделяется составляющая погрешности (например, случайная составляющая);
- Формируется модель погрешности (например, случайная величина);
- Характеристика погрешности определяется как параметр модели (СКО случайной величины);
- Эмпирическая характеристика погрешности (при обработке данных) определяется как оценка параметра модели (выборочное СКО).

Описанная схема кратко представлена на рис. 1.

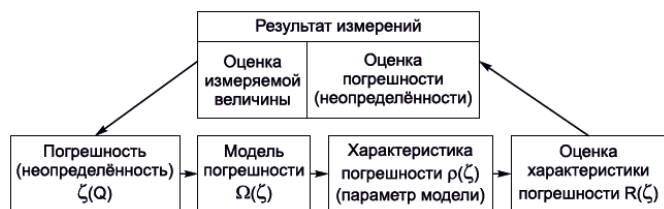


Рис. 1. Общая метрологическая схема определения и оценивания характеристик погрешностей

Такая схема, на первый взгляд, кажется очень простой, почти тривиальной; однако в методическом плане она оказывается весьма существенной, поскольку в метрологии важно не просто найти результат измерений, но и в особенности – корректно оценить погрешность полученного результата.

Кроме того, в данном случае – для ВА – это особенно значимо, поскольку необходимо понять соотношение ВА и классической дисперсии. В литературе неоднократно высказывались предложения использовать ВА не вместе, а вместо дисперсии [2, 8]. В то же время, опыт использования ВА показывает, что это принципиально другая характеристика погрешности, чем дисперсия, и было бы важно выявить, в чем их коренные различия.

Таким образом, исходная таблица сопоставления двух характеристик – ВА и дисперсии, которая и фиксирует задачу, поставленную в данной статье, может быть представлена следующим образом (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И ВАРИАЦИИ АЛЛАНА – ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

№		Дисперсия	Вариация Аллана
1	Модель погрешности	Случайная величина	???
2	Параметр масштаба (определение характеристики)	Дисперсия	???
3	Оценка параметра	Выборочная дисперсия	Вариация Аллана

Такого рода таблицы можно было бы сформировать и для сопоставления других пар характеристик; однако для ВА строки 1 и 2 неизменно останутся под вопросом. Одна из основных целей данной статьи и заключается в том, чтобы предложить возможный способ заполнения такого рода таблицы, которая позволит дать содержательную интерпретацию ВА как характеристики погрешности.

III. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

Строго говоря, в статистике ВА давно появилась в качестве альтернативной оценки дисперсии.

На сопоставлении ВА σ_a^2 с выборочной дисперсией S^2 основан классический критерий Аббе [6, 9]

$$r = \sigma_a^2 / S^2, \quad (2)$$

который обычно применяют для проверки гипотезы об отсутствии систематического сдвига в наборе данных

$\{x_1, \dots, x_n\}$ (при исследовании стабильности устройств и выявлении дрейфа показаний приборов).

К настоящему времени ВА широко используется в метрологической и приборостроительной практике. Первоначально введенная в области времени и частоты [1], ВА быстро распространилась и на другие области измерений [2, 3], и точного приборостроения (включая навигационные устройства) [4]. Опыт ее применения показал, что она особенно полезна в случае нестационарных сигналов (белых и $1/f$ – шумов, винеровских процессов), когда обычная дисперсия неприменима.

В настоящее время ВА входит в число нормируемых характеристик акселерометров, гироскопов, микромеханических устройств, регламентированных международными стандартами IEEE, прежде всего, [4], а также IEEE Std 647-1995, IEEE Std 1139-1988, IEEE Std 1554-2005.

При исследовании характеристик устройств с использованием ВА обычно придерживаются следующей последовательности:

- выполняют разложение шумов на «типовые» составляющие;
- исследуют асимптотическое поведение ВА для «типовых» составляющих (расчетным путем);
- выполняют анализ эмпирической ВА с целью выделения значимых составляющих и оценки их параметров.

В частности, для погрешностей гироскопов и акселерометров обычно используется следующее разложение на «типовые» составляющие:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) + x_4(t) + x_5(t) \quad (3)$$

где $x_1(t)$ – линейный дрейф (linear drift, linear trend, rate trend);

$x_2(t)$ – случайное блуждание угловой скорости или ускорения (rate / acceleration random walk);

$x_3(t)$ – нестабильность нуля (bias instability, rate / acceleration flicker noise);

$x_4(t)$ – случайное блуждание угла или скорости (rate white noise, angle / velocity random walk);

$x_5(t)$ – шум квантования выходного сигнала (angle / velocity quantization noise).

Приведенным «типовым» составляющим шумов соответствуют следующие модели:

$x_1(t) = R t$ – линейный дрейф;

$x_2(t)$ – случайное блуждание угловой скорости (ускорения) – Винеровский процесс;

$x_3(t)$ – нестабильность нуля – фликкер-шум;

$x_4(t)$ – случайное блуждание угла (скорости) – белый шум;

$x_5(t)$ – шум квантования.

Тогда математические ожидания ВА приведенных «типовых» составляющих имеют вид:

1 Линейный дрейф $x(t) = R t$: $E\sigma_1^2(\tau) = R^2 \tau^2/2$;

2 Случайное блуждание скорости (ускорения) (Винеровский процесс): $E\sigma_2^2(\tau) = K^2 \tau/3$;

3 Нестабильность нуля (фликкер-шум): $E\sigma_3^2(\tau) = B^2 2\ln 2/\pi$;

4 Случайное блуждание угла (белый шум): $E\sigma_4^2(\tau) = N^2/\tau$;

5 Шум квантования выходного сигнала: $E\sigma_5^2(\tau) = 3 Q^2/\tau^2$.

Таким образом, итоговое разложение математического ожидания ВА на « типовые » составляющие (в случае независимых составляющих шумов) имеет вид:

$$E\sigma_a^2(\tau) = \sum E\sigma_i^2(\tau) = R^2 \tau^2/2 + K^2 \tau/3 + B^2 2\ln 2/\pi + N^2/\tau + 3Q^2/\tau^2 \quad (4)$$

Приведенное разложение ВА на « типовые » составляющие графически представлено на рис. 2 (для наглядности принимается логарифмический масштаб по осям).

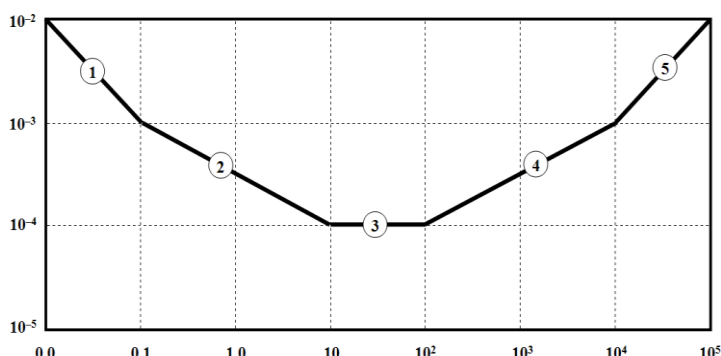


Рис. 2. Типовые наклоны для отклонения Алана в логарифмическом масштабе: 1 – шум квантования; 2 – белый шум; 3 – фликкер-шум; 4 – винеровский процесс; 5 – случайный наклон.

Приведенная « типовая » диаграмма, разумеется, является идеализированной, но может служить опорой при анализе эмпирической ВА, полученной по реальным данным. На основе анализа эмпирической ВА и сопоставления ее основных участков с типовыми ВА исследователь может выделять значимые составляющие погрешностей или шумов, приближенно оценивать их уровень и, следовательно, основные параметры в разложении (4).

Описанный эмпирический подход нередко позволяет выделить основные составляющие шумов, чтобы использовать для дальнейшего анализа более точные методы. Однако не всегда такой анализ оказывается однозначным и физически наглядным.

В некоторых случаях не удается достаточно четко выделить составляющие и их содержательно интерпретировать в рамках практической задачи. По-видимому, одна из причин затруднений состоит в том, что до настоящего времени не вполне ясен физический смысл ВА.

IV. ВЫБОР БАЗОВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

При выборе базовой стохастической модели для формального определения АВ целесообразно учитывать следующие свойства:

– модель должна быть существенно шире, чем множество стационарных процессов;

– желательно, чтобы модель имела простое и удобное на практике функциональное представление (аналогичное спектральному представлению для стационарного процес-

са) и физически наглядную характеристику масштаба (аналогичную классической дисперсии);

– модель должна включать наиболее важные нестационарные процессы, для которых АВ хорошо работает, прежде всего – винеровский процесс;

– модель должна обладать некоторыми свойствами стабильности, поскольку общий вид определения ВА – оценки (1) – говорит о том, что приращения процессов должны быть, в некотором смысле, однородными.

По-видимому, наилучшей моделью для ВА могло бы служить множество винеровских процессов, поскольку в этом случае последовательные приращения процесса независимы, то есть, их реализации образуют классическую выборку. Более того, в данном случае и внутренняя норма процесса по функциональному виду совпадает с ВА [10]. Однако такая модель, очевидно, является слишком узкой для практических целей. Кроме того, целесообразно все же включить в модель и стационарные процессы.

Достаточно содержательным и естественным расширением пространства стационарных процессов может служить множество процессов со стационарными приращениями [7], которое ввели А. Н. Колмогоров и А. М. Яглом в качестве математической (вероятностной) модели для исследований турбулентности атмосферы и океана [7, 11].

Приведем основные определения таких процессов и их характеристик. Случайный процесс $X(t)$, $-\infty < t < \infty$, называется процессом со стационарными приращениями [7], если математические ожидания его приращений на интервалах времени пропорциональны длинам интервалов:

$$E (X(s) - X(t)) = a (s - t),$$

и структурная функция (то есть, ковариация указанных приращений), зависит только от разностей моментов времени:

$$D_1(t; u, v) = E (X(u) - X(t)) (X(v) - X(t)) = D(u - t, v - t).$$

Таким образом, процесс определяется структурной функцией от двух переменных

$$D (\tau_1, \tau_2) = E (X(t + \tau_1) - X(t)) (X(t + \tau_2) - X(t)). \quad (5)$$

При этом процесс с вещественными значениями определяется даже более простой структурной функцией, зависящей от одной переменной

$$D_0(\tau) = E (X(t + \tau) - X(t))^2. \quad (6)$$

Множество процессов со стационарными приращениями, разумеется, содержит и все стационарные процессы, однако является существенным расширением последнего, поскольку кроме стационарных, содержит также ряд важных для практики нестационарных процессов, прежде всего – винеровский процесс, и некоторые другие.

Важным свойством процессов со стационарными приращениями является то, что они также имеют спектральные представления, но более общего вида

$$X(t) = \int (e^{it\lambda} - 1) / (i\lambda) dZ(\lambda) + X_0 \quad (7)$$

где $Z(\lambda)$ – случайная функция с некоррелированными приращениями.

При этом структурная функция такого процесса также имеет спектральное представление

$$D(\tau, \mu) = \int ((e^{i\tau\lambda} - 1)(e^{i\mu\lambda} - 1) / \lambda^2) dF(\lambda) \quad (8)$$

где $dF(\lambda)$ – неубывающая функция, такая, что

$$E |Z(\lambda) - Z(\mu)|^2 = F(\lambda) - F(\mu). \quad (9)$$

В частности, для вещественного процесса представление упрощается:

$$D_0(\tau) = 2 \int ((1 - \cos \tau\lambda) / \lambda^2) dF(\lambda). \quad (10)$$

В случае дифференцируемых процессов функция $F(\lambda)$ является ограниченной; в общем случае она удовлетворяет более слабым ограничениям: при любом $a > 0$ должны выполняться условия:

$$\int_a^\infty dF(\lambda) / \lambda^2 < \infty, \quad \int_{-\infty}^{-a} dF(\lambda) / \lambda^2 < \infty. \quad (11)$$

V. ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

Если принять в качестве исходной модели для определения ВА пространство процессов со стационарными приращениями, то эта характеристика получает естественную статистическую интерпретацию. В данном случае параметр масштаба (точнее, параметрическая характеристика масштаба) – структурная функция $D_0(\tau)$ вида (6), а вариация Аллана – задает статистическую (параметрическую) оценку этой характеристики.

Свойства ВА как оценки некоторой структурной функции $D_0(\tau)$ зависят от вида указанной функции, а также от распределений процесса $X(t)$. Так, если $X(t)$ имеет моменты порядка выше 2-го (в частности, при гауссовском распределении), то ВА будет несмещенной и состоятельной оценкой $D_0(\tau)$. При этом из спектрального представления для функции $D_0(\tau)$ получается также спектральное представление аналогичного вида для математического ожидания вариации Аллана.

$$E \sigma_a^2(\tau) = D_0(\tau)/2 = \int ((1 - \cos \tau\lambda) / \lambda^2) dF_0(\lambda). \quad (12)$$

Однако при этом имеются определенные особенности таких представлений, которые связаны с различными модификациями вариации Аллана, прежде всего – обусловленными различными способами осреднения данных на выделенных интервалах.

Таким образом, этот подход позволяет также уточнять определение характеристики и дает возможность ввести несколько модификаций вариации Аллана.

Во-первых, исходное выражение для ВА можно использовать для дискретного процесса (случайной последовательности) $\{x_k, k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots\}$:

$$\sigma_a^2 = \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1} - x_k)^2 / 2(n-1) \quad (13)$$

Во-вторых, это же выражение (13) можно использовать и для процесса с непрерывным временем $X(t)$, $-\infty < t < \infty$, если ввести простую τ -дискретизацию, то есть принять $x_k = X(k\tau)$.

В-третьих, можно рассмотреть δ -сглаженный процесс, то есть, определить $x_k = x_k(\delta)$ как среднее сигнала $X(t)$ на

интервале $(k\tau, k\tau + \delta)$, $\delta \leq \tau$, и использовать выражение (13).

Наконец, традиционное выражение вариации Аллана (1) соответствует τ -сглаженному процессу (при $\delta = \tau$).

Таким образом, «дискретная» вариация Аллана (13) в первых двух случаях является непосредственной оценкой структурной функции $D_0(\tau)/2$.

В двух других случаях (при сглаженных сигналах) вариация Аллана (1) является оценкой соответствующей сглаженной структурной функции $D_\delta(\tau)/2$.

При такой интерпретации, из спектрального представления для исходной структурной функции $D_0(\tau)$ или сглаженной $D_\delta(\tau)$ получается также спектральное представление для математического ожидания вариации Аллана.

Отмеченный эффект сглаживания спектра (при усреднении процесса на интервале) непосредственно проявляется также в известном [3] спектральном представлении для вариации Аллана стационарного процесса со спектральной плотностью $f(\lambda)$:

$$E \sigma_a^2(\tau) = 2 \int f(\lambda) \sin^4(\tau\lambda) / (\tau\lambda)^2 d\lambda. \quad (14)$$

В частности, из этого следует, что вариация Аллана $\sigma_a^2(\tau)$ – не просто альтернативная оценка дисперсии, а оказывается принципиально другой масштабной характеристикой погрешности, нежели классическая дисперсия S^2 . Это может открывать новые возможности для совместного использования этих двух характеристик при обработке данных и контроле параметров систем.

Таким образом, появляется возможность дополнить исходную табл. 1 в части информации о вариации Аллана; в результате получается итоговая табл. 2 для сопоставления дисперсии и ВА.

Такого рода таблица наглядно показывает соотношение двух указанных оценок масштаба, их существенные отличия и различные области применения.

ТАБЛИЦА 2. ИТОГОВОЕ СОПОСТАВЛЕНИЕ ДИСПЕРСИИ И ВАРИАЦИИ АЛЛАНА

№		Дисперсия	Вариация Аллана
1	Модель погрешности	Случайная величина x	Процесс со стационарными приращениями $x(t)$
2	Параметр масштаба (определение характеристики)	Дисперсия D	Структурная функция $D_0(t)$
3	Оценка параметра масштаба	Выборочная дисперсия S^2	Вариация Аллана $\sigma_a^2(\tau)$

Сопоставление дисперсии и вариации Аллана на основе их базовых моделей показывает, что это существенно различные оценки, предназначенные для разных параметров процессов. Применение вариации Аллана дополняет

анализ на основе дисперсии при решении практических задач, в частности, на расширенном множестве моделей (при наличии трендов и нестационарных процессов).

Следовательно, в широком круге задач совместное применение дисперсии и вариации Аллана также оказывается эффективным. Их взаимосвязи необходимо учитывать при интерпретации результатов обработки данных и формировании выводов в предметной области.

Предлагаемый метрологический подход к обоснованию ВА также согласуется с функциональной моделью на основе гильбертовых пространств, определяемых корреляционными функциями процессов [10].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Вариация Аллана представляет собой актуальную характеристику погрешностей и шумов, которая позволяет выявлять свойства погрешностей во временной области.

2) Для обоснования вариации Аллана в качестве базовой модели целесообразно использовать пространство случайных процессов со стационарными приращениями.

3) В рамках предложенной модели вариация Аллана является эмпирической оценкой структурной функции $D_0(\tau)$.

4) Спектральные представления структурных функций $D_0(\tau)$ позволяют также получить соответствующие представления для вариации Аллана.

5) Сопоставление дисперсии и вариации Аллана на основе их базовых моделей показывает, что ВА является оценкой другого вида, основанной на другой масштабной характеристике – структурной функции $D_0(\tau)$.

6) Вариация Аллана дополняет дисперсию при решении практических задач, в частности, на расширенном множестве моделей (при наличии трендов и нестационарных процессов).

Следовательно, в широком круге задач совместное применение дисперсии и вариации Аллана также оказывается эффективным.

Благодарности

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Allan D. W., Ashby N., Hodge C. C. The Science of Timekeeping. – Application Note 1289, Hewlett-Packard Company, 1997.
- [2] Allan D. W. Historicity, Strengths, and Weaknesses of Allan Variances and Their General Applications – Proc. 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems; Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg, 2015.
- [3] Witt T. J. Testing for correlations in measurements with the Allan Variance – In: “Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology IV” World Scient. Publ. - 2000. – P. 273-288.
- [4] IEEE Std 952-1997 IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.

- [5] Granovsky V. A., Siraya T. N. Measurement quality characteristics in metrology: systemic approach. – In: XVII IMEKO World Congress, 2003, Dubrovnik.
- [6] Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки данных при измерениях – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
- [7] Yaglom A. M. Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions. – Vol. 1, Vol. 2 – Springer – Verlag, NJ, 1987
- [8] Allan D.W. Should the classical variance be used as a basic measure in standards metrology? – IEEE Trans. on Instr. & Meas., v. IM-36, 1987, pp. 646-654.
- [9] Браунли К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – «Наука», Физматлит, 1977.
- [10] Siraya T. N. Comparison of uncertainty estimates: Allan variance and sample variance. – Proc. Internat. Conf. “Measurement – 2001”, Bratislava, 2001.
- [11] Yaglom A. M. Stationary random functions. – Prentice Hall, NJ, 1962.

Влияние неидентичности элементарных приёмных каналов антенны на погрешность определения пеленга целей

Н. Г. Воронина, А. С. Ефимова, В. Н. Тимофеев
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация — Исследуется влияние инструментальных составляющих на погрешность пеленгования в задаче обработки сигналов, поступающих с выхода фазированной антенной решетки. Предложена методика вычисления предельно допустимых погрешностей элементарных приёмных каналов антенн для обеспечения заданной погрешности пеленгования. Приведены результаты компьютерного моделирования предложенной методики для антенны цилиндрической конфигурации.

Ключевые слова — гидроакустика; приборная ошибка пеленгования

I. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании гидроакустических и радиолокационных средств наблюдения основным требованием, предъявляемым к приёмному тракту, является погрешность определения координат обнаруживаемых объектов. Как правило, погрешность задаётся в техническом задании на разрабатываемое средство наблюдения. Для соблюдения требований технического задания изделием в целом, необходимо правильно рассчитать требования ко всем входящим в него приборам, в частности, к антенне.

Для правильно реализованных алгоритмов формирования характеристики направленности антенной решётки и точном знании скорости распространения волны в месте нахождения антенны математическое ожидание погрешности пеленгования равно нулю. Таким образом, на смещение погрешности пеленгования влияет только приборная (инструментальная) погрешность антенной системы.

Под приборной погрешностью пеленгования понимается погрешность измерений курсового угла плосковолнового однолучевого сигнала при бесконечно большом отношении сигнал/помеха.

Приборная погрешность пеленгования является следствием погрешности фазирования элементарных приёмных каналов антенны, которая, в свою очередь, может быть вызвана неточностью позиционирования датчиков (вследствие чего антенная решётка становится не эквидистантной) и/или неидентичностью фазо-частотных характеристик (ФЧХ) трактов предварительной обработки элементарных приёмных каналов антенны. Особенностью влияния погрешности позиционирования датчиков является зависимость итоговой погрешности пеленгования от

угла компенсации характеристики направленности относительно нормали к антенне.

Задачи оценки и компенсации погрешности измерений координат средствами наблюдения широко обсуждаются в специальной литературе [1-4]. Так, применяется калибровка антенн с помощью тестовых сигналов для компенсации фазовых сдвигов датчиков [1]. При использовании конформных антенн предложены методы компенсации деформации и вибрации антенны в процессе движения носителя [2,3]. Моделирование погрешностей, возникающих в процессе длительной эксплуатации антенны (смещение расположения, изменение ФЧХ), проведено в [4].

В настоящей работе рассматривается вопрос расчёта предельно допустимых погрешностей указанных параметров приёмных антенн в зависимости от заданной в техническом задании на средство наблюдения приборной погрешности пеленгования целей.

II. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поскольку оба вида упомянутых во введении погрешностей элементарных приёмных каналов носят случайный характер, а также по причине большого числа датчиков в антеннах, целесообразно использовать численный метод определения параметров приборной погрешности пеленгования. Аналитическое решение задачи невозможно в случаях сложной конфигурации антенны, при наличии обтекателей или экрана, вносящих нелинейный характер в зависимости для погрешностей. В общем случае наиболее удобным решением для таких задач является моделирование методом Монте-Карло.

Методика моделирования делится на следующие этапы:

- моделирование плоского фронта тонального сигнала на антенне с заданными погрешностями позиционирования датчиков и ФЧХ каналов;
- расчёт коэффициентов фазирования для идеальной (без погрешностей) антенны;
- расчёт фактической характеристики направленности антенны при данной случайной реализации погрешностей приёмных каналов антенны и оценка её смещённости;

- повторение описанных процедур для большого количества реализаций случайных (с фиксированным СКО) погрешностей элементарных каналов антенны.

Для исследований выбрана цилиндрическая антенна с горизонтальной образующей из L дуг по N датчиков в каждой. Пусть $\sigma_{KU}(\sigma_l, \sigma_\varphi)$ – среднеквадратическая погрешность (СКП) пеленгования, σ_l – СКП позиционирования датчиков по горизонтали, σ_φ – СКП фазово-частотной характеристики (ФЧХ) приёмного канала антенны.

Моделирование плоского фронта сигнала с заданного направления X производится по формуле (1):

$$X(l, q, \alpha_0, \beta_0, \lambda, \Delta, \varphi) = \frac{1}{NL} \cdot e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (l_0(l-1) + \Delta_{l,q}) \sin \alpha_0} \cdot e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R \left[(\cos(\beta_q) - \cos(\beta_A)) \cos(\alpha_0) \cos(\beta_0) + (\sin(\beta_q) - \sin(\beta_A)) \sin(\beta_0) \right]} \cdot e^{\varphi_{l,q}}, \quad (1)$$

где N – количество датчиков в дуге; L – количество дуг; $\beta_q = \left(\frac{H+1}{2} - q \right) \cdot \frac{h_0}{R}$ – угловое положение q -го датчика дуги относительно горизонтали; l_0 – расстояние между дугами; l – номер датчика по горизонтали; q – номер датчика по вертикали; h_0 – расстояние между датчиками по вертикали; β_A – угловое смещение оси антенны относительно горизонтали; R – радиус дуги; λ – длина волны; β_0 – направление прихода волны по вертикали; α_0 – направление прихода волны по горизонтали; $\Delta_{l,q}$ – погрешность позиционирования датчика по горизонтали в зависимости от номера датчика (м); $\varphi_{l,q}$ – погрешность ФЧХ приёмного канала в зависимости от номера датчика (рад.). В приёмных каналах антенны вводятся два типа погрешностей: массив погрешностей позиционирования $\Delta_{l,q}$ и массив погрешностей ФЧХ $\varphi_{l,q}$. Предполагается, что эти погрешности распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и СКП σ_l и σ_φ соответственно.

Коэффициенты фазирования для компенсации антенны в заданном направлении рассчитываются по формуле [5]:

$$V(l, q, \alpha, \beta, \lambda) = \frac{1}{NL} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} l_0(l-1) \sin \alpha} \cdot e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} R \left[(\cos(\beta_q) - \cos(\beta_A)) \cos(\alpha) \cos(\beta) + (\sin(\beta_q) - \sin(\beta_A)) \sin(\beta) \right]}, \quad (2)$$

где β – направление компенсации антенны по вертикали; α – направление компенсации антенны по горизонтали.

Расчёт характеристики направленности антенны производится по формуле (3):

$$D(\alpha, \beta, \alpha_0, \beta_0, \lambda, \Delta, \varphi) = \sum_{l=1}^L \sum_{q=1}^N V(l, q, \alpha, \beta, \lambda) \cdot X(l, q, \alpha_0, \beta_0, \lambda, \Delta, \varphi) \quad (3)$$

Оценивая разность курсового угла максимума фактической характеристики направленности D и заданного направления прихода волны можно вычислить погрешность пеленгования на текущем цикле моделирования.

Проведя описанные выше вычисления достаточно большое количество раз (для различных реализаций погрешности (Δ, φ) на датчиках при фиксированных значениях их СКП), можно вычислить СКП пеленгования σ_{KU} . Изменяя параметры неидентичности элементарных приёмных каналов, можно построить график зависимости СКП пеленгования от СКП элементарных приёмных каналов $\sigma_{KU}(\sigma_l, \sigma_\varphi)$.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Поскольку погрешность пеленгования увеличивается с ростом угла компенсации характеристики направленности (ХН), наиболее интересным случаем для моделирования является скомпенсированная на краю сектора обзора ХН.

При моделировании были выбраны следующие параметры антенной системы:

- количество датчиков по вертикали и горизонтали – 30 и 20 соответственно;
- модельная частота – проектная частота антенны;
- моделируемый сектор обзора от -60° до 60° ;
- количество моделируемых пространственных каналов 100000 (шаг сетки системы обзора $0,072^\circ$);
- курсовой угол компенсации 40° ;
- количество итераций при расчёте СКП пеленгования при фиксированных параметрах погрешностей элементарных каналов 1000;
- заданная предельная СКП пеленгования целей $7'$.

Результаты моделирования представлены на рис. 1-4. На рис. 1-3 показаны графики функции $\sigma_{KU}(\sigma_l, \sigma_\varphi)$ в зависимости от значения аргументов. На рис. 4 приведён пример модельных ХН при различных реализациях исходных массивов погрешностей (Δ, φ) .

Графики на рисунках 1-3, построенные по описанной в разделе 2 методике, показывают зависимость СКП пеленгования от СКП позиционирования датчиков и СКП ФЧХ элементарных приёмных каналов. По этой зависимости, имея заданный в техническом задании предел СКП пеленгования, можно задать предельные СКП для позиционирования датчиков и ФЧХ элементарных приёмных кана-

лов антенны, причём компромиссно, учитывая, какую из погрешностей легче минимизировать.

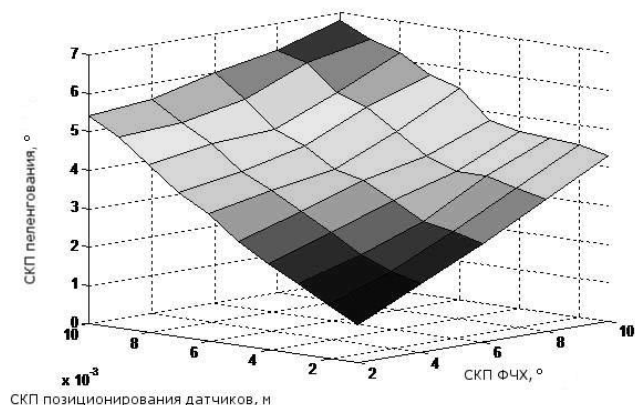


Рис. 1. Зависимость СКП пеленгования от СКП позиционирования датчиков и СКП ФЧХ элементарных приёмных каналов.

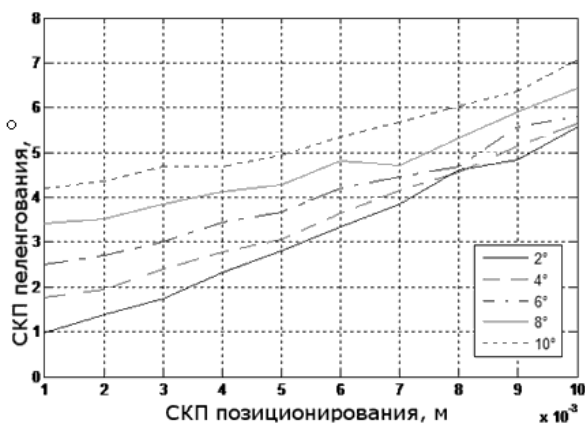


Рис. 2. Зависимость СКП пеленгования от СКП позиционирования датчиков при фиксированных значениях СКП ФЧХ элементарных приёмных каналов (от 2° до 10°).

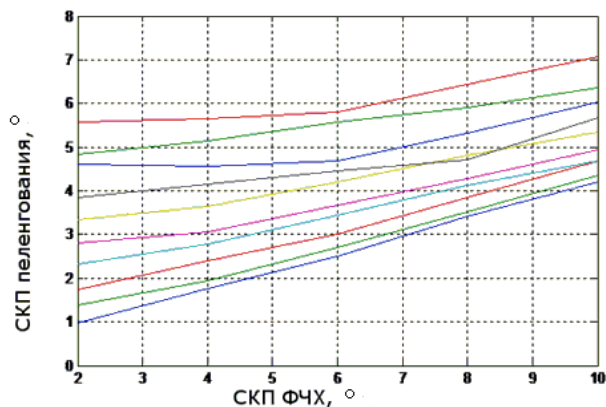


Рис. 3. Зависимость СКП пеленгования от СКП ФЧХ элементарных приёмных каналов при фиксированных значениях погрешности позиционирования датчиков (от 1 до 10 м).

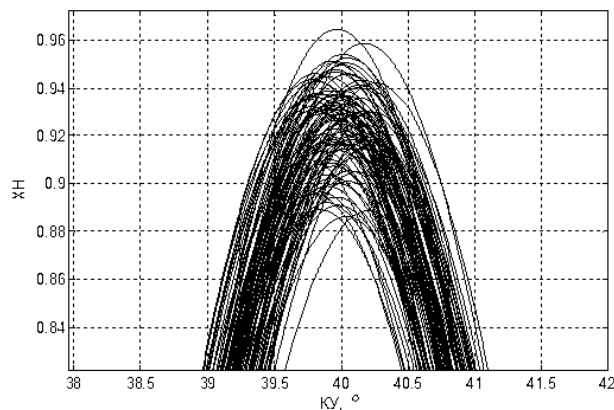


Рис. 4. Смоделированные с учётом погрешностей характеристики направленности.

Рис. 4 показывает, что погрешности при фазировании элементарных каналов антенны приводят не только к смещённости $XН$, но и к ухудшению направленных свойств антенны (уменьшению коэффициента направленного действия).

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика определения технических требований к антенне по заданной предельной приборной погрешности пеленгования целей. Методика проверена на цилиндрической антенне. Расчёты, проведенные согласно разработанной методике, позволяют выявить зависимость между погрешностями параметров элементарных каналов и погрешностью пеленгования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zezong Chen, Gengfei Zeng, Chen Zhao and Longgang Zhang A phase error estimation method for broad beam high-frequency radar IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS, VOL. 12, NO. 7, JULY 2015
- [2] Knott, P. Deformation and Vibration of Conformal Antenna Arrays and Compensation Techniques. In Multifunctional Structures / Integration of Sensors and Antennas (pp. 19-1 – 19-12). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-141, Paper 19. Neuilly-sur-Seine, France:RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>.
- [3] NATO Research and Technology Organisation SET-087 / RTG 50 on Vibrating Antennas and Compensation Techniques, Aerospace conference, 2007.
- [4] Rias Muhamed Direction of arrival estimation using antenna arrays, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [5] М.Д. Смаришев Направленность гидроакустических антенн, изд. Судостроение, Ленинград, 1973.

Способы оценки уровня адекватности имитационного программно-алгоритмического обеспечения

В. В. Беляева, В. А. Грановский
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Санкт-Петербург, Россия
vgranovsky@eprib.ru

В. В. Прокопович, А. В. Шафранюк
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Санкт-Петербург, Россия
wm.prokopovich@yandex.ru, andrey.shafraanyuk@mail.ru

Аннотация – Доклад посвящён вопросу оценки адекватности имитаторов гидроакустических средств. Задачи формирования моделей функционирования гидроакустических комплексов, благодаря развитию вычислительных систем, становятся всё более актуальными, что связано с возможностью существенного сокращения издержек, особенно на этапах технического проекта и разработке рабочей документации. Использование имитационных программных комплексов нацелено на создание адекватной модели входных данных обрабатываемого штатного программно-аппаратного обеспечения, что позволит обеспечить хорошую переносимость полученных при отработке штатного программного обеспечения результатов на этап морской отработки. В докладе рассматривается сформированная в ходе практических работ методика, позволяющая не только оценить адекватность разработанного имитатора, но и обеспечить его доработку для нужд конкретного штатного программного обеспечения с учётом такой особенности гидроакустических комплексов как многоуровневость обработки данных.

Ключевые слова — оценка адекватности, имитационное моделирование, метрологическая аттестация

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные системы освещения обстановки, в состав которых входят гидроакустические комплексы, весьма сложны. Типичная структура обработки данных в таких комплексах приведена на рисунке 1.

К основным уровням обработки информации относятся: формирование оценки пространственно-частотного спектра, преиндикаторная, первичная, вторичная и комплексная обработка информации. При этом наблюдается строгое сжатие количества синтаксической информации по Шеннону при обработке её на каждом уровне, что связано фильтрацией шумовых данных. На рис. 1 приведены объёмы данных за время 1 с в единицах чисел с плавающей запятой.

Разработка подобных систем является весьма затратной задачей и требует значительного времени. Одним из способов уменьшения требуемых (указанных выше) ресурсов является разработка имитационно-моделирующих комплексов, решающих целый ряд задач:

- 1) разработка моделей функционирования гидроакустических станций при принятии технических решений на этапе технического проекта;
- 2) обеспечение отладки алгоритмического и программного обеспечения (ПО) универсальных и специальных вычислителей;
- 3) подготовка операторов гидроакустических станций с использованием тренажёров.

Использование имитационного обеспечения (включающего алгоритмы, реализующее их ПО, и аппаратную платформу, на которой выполняется это ПО) для каждого из этих уровней обладает рядом своих особенностей и подробно рассмотрено в работе [1]. Эти особенности состоят в следующем (в соответствии с вышеприведённым списком):

1) доминирование теоретических расчётных моделей, адекватность которых относительно декларативных определяется лишь качеством их реализации в программном имитационном обеспечении. Оценка адекватности таких моделей возможна только для разработанных комплексов и её переносимость на вновь разрабатываемые остаётся открытым вопросом;

2) итерационный способ разработки штатного ПО и слабо определённые технические требования (ТТ) к имитатору. Более подробно это будет рассмотрено ниже;

3) акцентированность тренажёров на визуальной информации, с которой работает оператор комплекса, наблюдении временных диаграмм, логическом взаимодействии и реализации обратных связей по управлению. Следствием этого служит слабая связь с требованиями, выдвигаемыми к самим комплексам со стороны производителя.

В статье анализируется оценка адекватности для имитационных систем, нацеленных на отработку алгоритмов и штатного ПО.

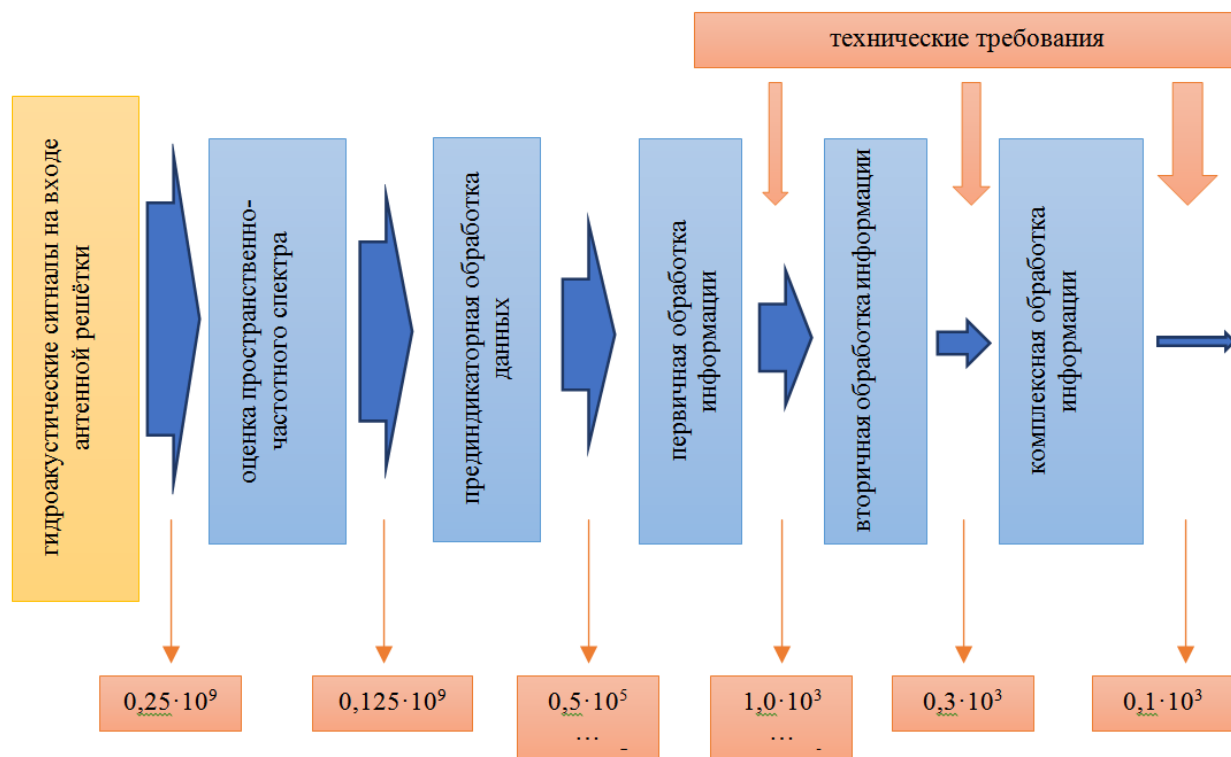


Рис. 1. Многоуровневая структура обработки данных в гидроакустическом комплексе

II. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Для отработки многоуровневого ПО гидроакустического комплекса разрабатывается многоуровневая имитационная модель [2-4], с использованием которой происходит формирование входных данных для каждого уровня обработки информации (рис. 1). В связи с разработкой такой модели возникает задача её аттестации как в интересах выявления её возможностей при отработке ПО, так и в интересах использования при проведении стендовых испытаний в качестве средства испытаний.

В качестве норм при метрологической аттестации могут выступать как достаточно чёткие аппаратные показатели [1], так и такое размытое понятие как адекватность модели, подходы к определению которой описаны в [9, 10]. В задачах имитации в гидроакустике понятие адекватности зачастую используется интуитивно, без соответствующего уточнения. Тем не менее, существуют общие подходы к оценке адекватности подобных имитационных моделей, зависящие от уровня, для которого вырабатываются входные данные. В соответствии с рис. 1, соответствующие уровни данных и проверяемые на них параметры приведены в таблице 1.

Входными данными в задаче оценки пространственно-частотного спектра являются последовательности отсчётов во временной области на выходах датчиков антенной

решётки. Причём эти данные, как правило, формируются для низких соотношений сигнал/помеха. К такой информации в ТТ на гидроакустический комплекс не предъявляют каких-либо количественных требований и его непосредственная проверка существенно затруднена. В этом случае для проверки используют модель ПО (реже - собственно штатное ПО) для оценки пространственных спектров мощности в широком и узком диапазонах частот. Соответственно параметры, указанные в табл. 1, проверяются по выходу именно такого ПО, а не непосредственно имитационной модели. К недостаткам данного способа проверки можно отнести следующие:

1) проверка осуществляется выборочно по нескольким пространственным направлениям для нескольких частот (частотных диапазонов). Таким образом, полнота объёма проверяемой информации во входных данных низкая;

2) количественные критерии, характеризующие данные на входе задачи, не регламентируются ТТ. Таким образом, опыт и наработки в данной области практически отсутствуют и выдвигаемые требования назначаются зачастую волонтеристски, соответственно проводится выборочная проверка для нескольких пространственных каналов и частот (частотных диапазонов). Ввиду малой коррелированности данных это приводит к указанной неполноте проверки.

ТАБЛИЦА 1. СПИСОК ПРОВЕРЯЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО ВХОДАМ ШТАТНОГО ПО, НАЧИНАЯ С ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Уровень обработки информации, для которого формируются имитационные данные	Проверяемая величина	Норма
оценка пространственно-частотного спектра	курсовые углы максимумов отдельно стоящих отметок	математическое ожидание максимума пеленгационного рельефа в горизонтальной плоскости и его СКО для периодов обработки данных в соответствии с ТТ к штатному ПО
	вертикальные углы максимумов отдельно стоящих отметок	то же для вертикальной плоскости
	угловая разрешимость максимумов близко расположенных отметок	минимальные углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях, при которых максимумы двух отметок наблюдаются раздельно по контрасту не менее 3 дБ. Должны соответствовать требованиям к оценке пространственного спектра в гидроакустической системе
формирование (оценка) пространственно-частотного спектра	анизотропия шума	интенсивность шума в зависимости от типа нормирования характеристик направленности антенной решётки и заданного вида анизотропии помехи моря
	равномерность шумового поля	отсутствие корреляции по времени и пространству во всём диапазоне курсовых и вертикальных углов для заданного в имитации изотропного шума
прединдикаторная обработка данных	курсовые углы максимумов отдельно стоящих отметок	математическое ожидание максимума пеленгационного рельефа в горизонтальной плоскости и его СКО для периодов обработки данных в соответствии с ТТ к штатному ПО
	вертикальные углы максимумов отдельно стоящих отметок	то же для вертикальной плоскости
первичная обработка информации	курсовые и вертикальные углы отметок	соответствие математического ожидания и СКО курсовых и вертикальных углов отметок, связанных с истинными целями, требованиям к штатному ПО
	иные параметры отметок	соответствие иных параметров отметок требованиям к штатному ПО
вторичная обработка информации (траекторный анализ и классификация)	курсовые и вертикальные углы координат целей	соответствие математического ожидания и СКО курсовых и вертикальных углов на цели, связанные с истинными целями, требованиям к штатному ПО
	параметры целей	соответствие иных параметров целей требованиям к штатному ПО
	параметры спектра наблюдаемого сигнала	соответствие частот и ОСП дискретных составляющих заданным параметрам имитационных моделей
комплексная обработка информации	координатные параметры целей	соответствие математического ожидания и СКО координат целей, связанных с истинными целями, требованиям к штатному ПО
	среднее время сопровождения целей	совпадает с соответствующей нормой для штатного ПО
	вероятность правильной классификации	
	вероятность правильной идентификации	
	вероятность ложной классификации	
	вероятность ложной идентификации	

Также отметим, что для контроля данных требуется не просто технологическое ПО, вычисляющее требуемые статистики, а, как правило, полноценная реализация задач оценки пространственно-частотного спектра и прединдикаторной, а иногда и части первичной обработки информации.

Проверка моделирования данных на входе прединдикаторной обработки проводится аналогичным описанному способом и ей присущи все указанные недостатки. Отличие заключается лишь в том, что не требуется оценка пространственно-частотного спектра. Проверка модельных данных на входе задачи первичной обработки данных также относится к данной категории с исключением макетирования задачи прединдикаторной обработки.

Модельные входные данные для задачи вторичной обработки имеют более структурированный вид, но требования ТТ ко входу данной задачи также зачастую отсутствуют, кроме, как правило, пределов изменения параметров и потока ложных отметок. Из всех имеющихся в наличии параметров отметок более или менее правдоподобные требования можно выдвинуть относительно координатных (угловых) параметров путём их сопоставления с

известными истинными данными, заложенными в описании моделируемого тактического эпизода. Но это возможно лишь частично ввиду многообразия различных воздействий и сложности учёта корреляционных соотношений. Аналогичные проблемные моменты существуют и у входных модельных данных комплексной обработки.

Модельные выходные данные комплексной обработки в рамках данной статьи не рассматриваются, так как они не используются для целей отработки штатного ПО, а предназначены для прогнозных расчётов на этапе технического проекта либо для отладки систем отображения, требования к адекватности данных в которых существенно ниже.

К общим недостаткам всех указанных проверок относятся:

1) отсутствие количественных показателей в ТТ на подавляющее большинство параметров вырабатываемых модельных данных на входах соответствующих уровней обработки информации в гидроакустических комплексах (рис. 1);

2) рост объёмов информации во входных данных с понижением уровня обработки, требования к которым установить сложно даже экспертным способом;

наличие сложно вычисляемых корреляционных зависимостей между данными.

III. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ УРОВНЯ АДЕКВАТНОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Опыт работы по созданию и аттестации подобных имитационных комплексов позволил по-новому подойти к решению обозначенных выше проблем.

Основная идея подхода состоит в следующем:

1) адекватность работы любых двух имитационных моделей (адекватность вырабатываемых с их использованием входных данных для обрабатываемого штатного ПО) определяется статистической близостью выходных данных штатного ПО, соответствующего любому последующему уровню обработки, и ПО, функционирующего на основе данных, выработанных с использованием этих моделей;

2) алгоритмы формирования имитационных входных данных более низких уровней обработки являются более адекватными, что определяется уровнем теоретической проработки моделей;

3) модели более высоких уровней должны учитывать особенности функционирования штатного ПО в общем виде, что является довольно сложной задачей. Отметим, что модели входных данных более высокого уровня являются декларативными, а менее высокого – императивными [5];

4) обрабатываемое и участвующее в аттестации штатное ПО предполагается (и является) достаточно отработанным и не содержит существенных (фатальных) ошибок, о чём будет сказано ниже. При этом точное определение достаточной отработанности штатного ПО к настоящему моменту не выработано и требует дальнейших исследований.

$$\forall \{m, n, i\} \alpha_{0, m, n} > \alpha_{0, i}$$

$$\text{при} \begin{cases} \mathbf{X}_i(\mathbf{P}_{TS}, \mathbf{\Gamma}_i) = \mathbf{Y}_i(\mathbf{P}_{TS}, \mathbf{\Gamma}_i), i \in 1, \dots, N \\ \mathbf{X}_m(\mathbf{P}_{TS}, \mathbf{\Gamma}_m) = \mathbf{Y}_k(\mathbf{P}_{TS}, \mathbf{\Gamma}_k), k \in 1, \dots, N, m \in 1, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mathbf{P}_{TS}$ – параметры тактического эпизода за исключением гидрологических, $\mathbf{\Gamma}_i$ – i -я совокупность гидрологических параметров, N – число (достаточно большое) различных гидрологий, которое в простейшем случае можно ограничить набором из типовых гидрологий.

На практике встречаются более сложные случаи, когда штатное ПО, для которого генерируется модельный вход, находится в процессе отладки. Более того, в наличии может присутствовать только один уровень штатного ПО. При этом требуется проверить адекватность имитационной модели. В этом случае аттестация модели (её верификация) будет являться одной из итераций отладочного цикла. Рассмотрим данную методику подробнее (рис. 3).

Соответствующая данному подходу схема итерационной отработки и итоговой аттестации представлена на рисунке 2. Частично данный подход был использован при подготовке доклада [5].

Назовём такую схему аттестации и отработки имитационной модели верификацией методом повышения императивности. Как видно из рис. 2, в этом случае происходит запуск двух цепочек штатного ПО от имитационных данных различного уровня. В том случае, когда для множеств

$$\mathbf{X}_i = \{x_{i,1}, \dots, x_{i,n}, \dots, x_{i,N}\} \quad \text{и}$$

$\mathbf{Y}_i = \{y_{i,1}, \dots, y_{i,n}, \dots, y_{i,N}\}$, имеющих распределения независимых случайных величин по законам $\mathbf{F}$ и $\mathbf{G}$ соответственно, верна гипотеза $\mathbf{F} = \mathbf{G}$ по критерию Лемана-Розенבלата [7, 8], то можно утверждать, что имитационная модель данных на входе первичной обработки адекватна имитационной модели гидроакустических сигналов на входе антенной решётки. Если в качестве исходных использовать натурные данные, то возможно установить адекватность этим данным имитационной модели, однако это потребует подробной информации об эксперименте и контролируемых условиях (измерений гидрологических параметров, взаиморасположения источников и приёмников и т.п.), что далеко не всегда возможно.

При этом необходимо определить уровень значимости α , который должен быть применён для установления факта соответствия выборок $\mathbf{X}_i$ и $\mathbf{Y}_i$ в отношении законов распределения A_i [8].

По сути, это косвенно определяет допустимое статистическое расхождение между $\mathbf{X}_i$ и $\mathbf{Y}_i$. Обозначим через

α_0
 $\mathbf{X}_i = \mathbf{Y}_i$ согласие между выборками $\mathbf{X}_i$ и $\mathbf{Y}_i$ при уровне значимости не меньшем α_0 , тогда адекватность модели будет устанавливаться соблюдением условия:

На рисунке красным пунктиром обведено отлаживаемое ПО. В этом случае присутствуют следующие ограничения:

1) в случае отсутствия отлаженного штатного и имитационного ПО проверяемые данные будут вычисляться в соответствии со следующими символическими формулами:

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_i &= (\mathbf{B} + \delta \mathbf{b}) \mathbf{Z}_i; \\ \mathbf{Y}_i &= (\mathbf{B} + \delta \mathbf{b})(\mathbf{A} + \delta \mathbf{A}), \end{aligned}$$

где $\mathbf{B}$ – передаточная функция «правильно» работающего штатного ПО, $\delta \mathbf{b}$ – «погрешность» работы штатного ПО, вызванная неотработанными ошибками, $\mathbf{Z}_i$ – входные данные штатного ПО, формируемые по цепочке от

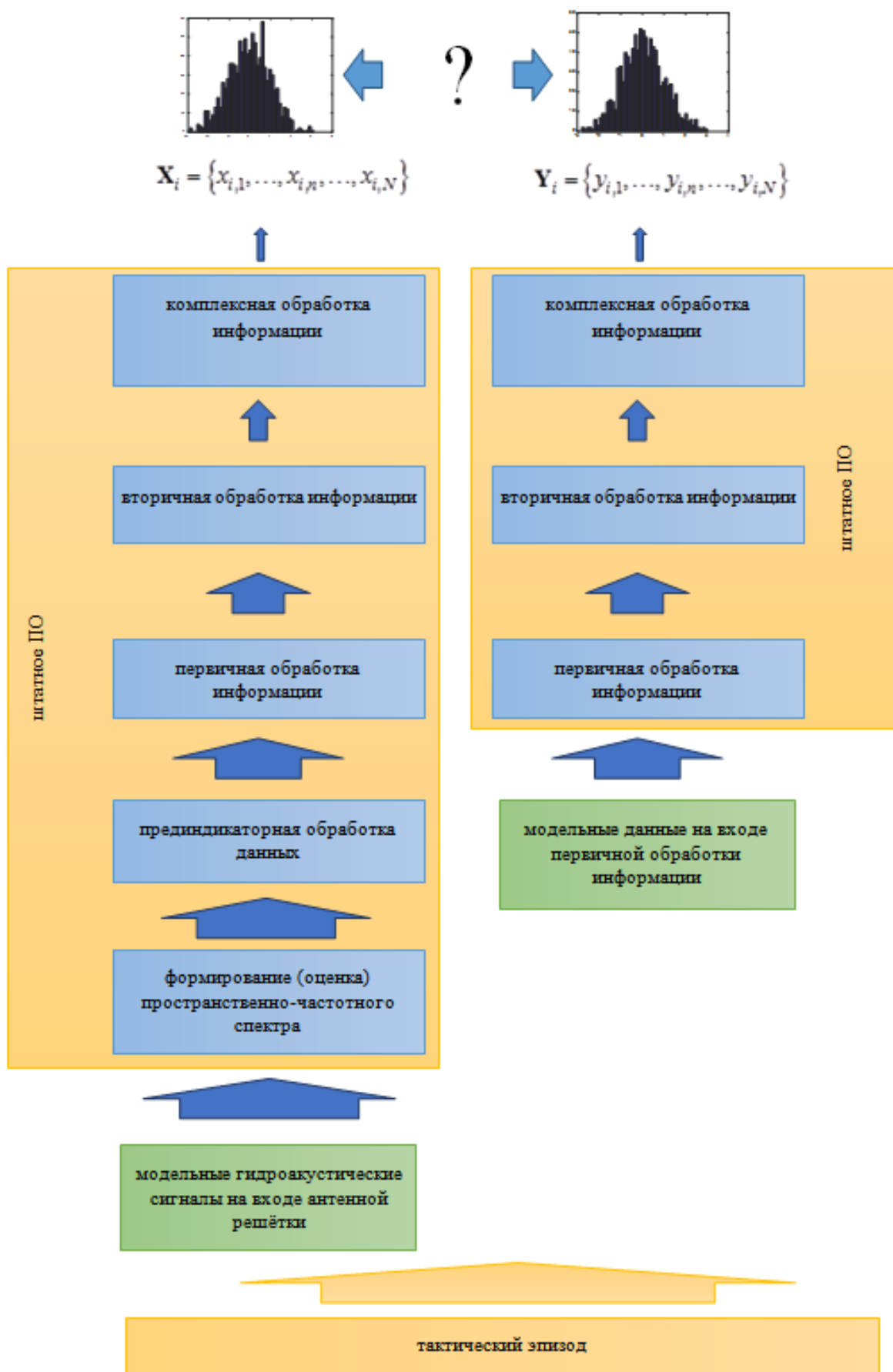


Рис. 2. Схема отработки и аттестации имитационной модели

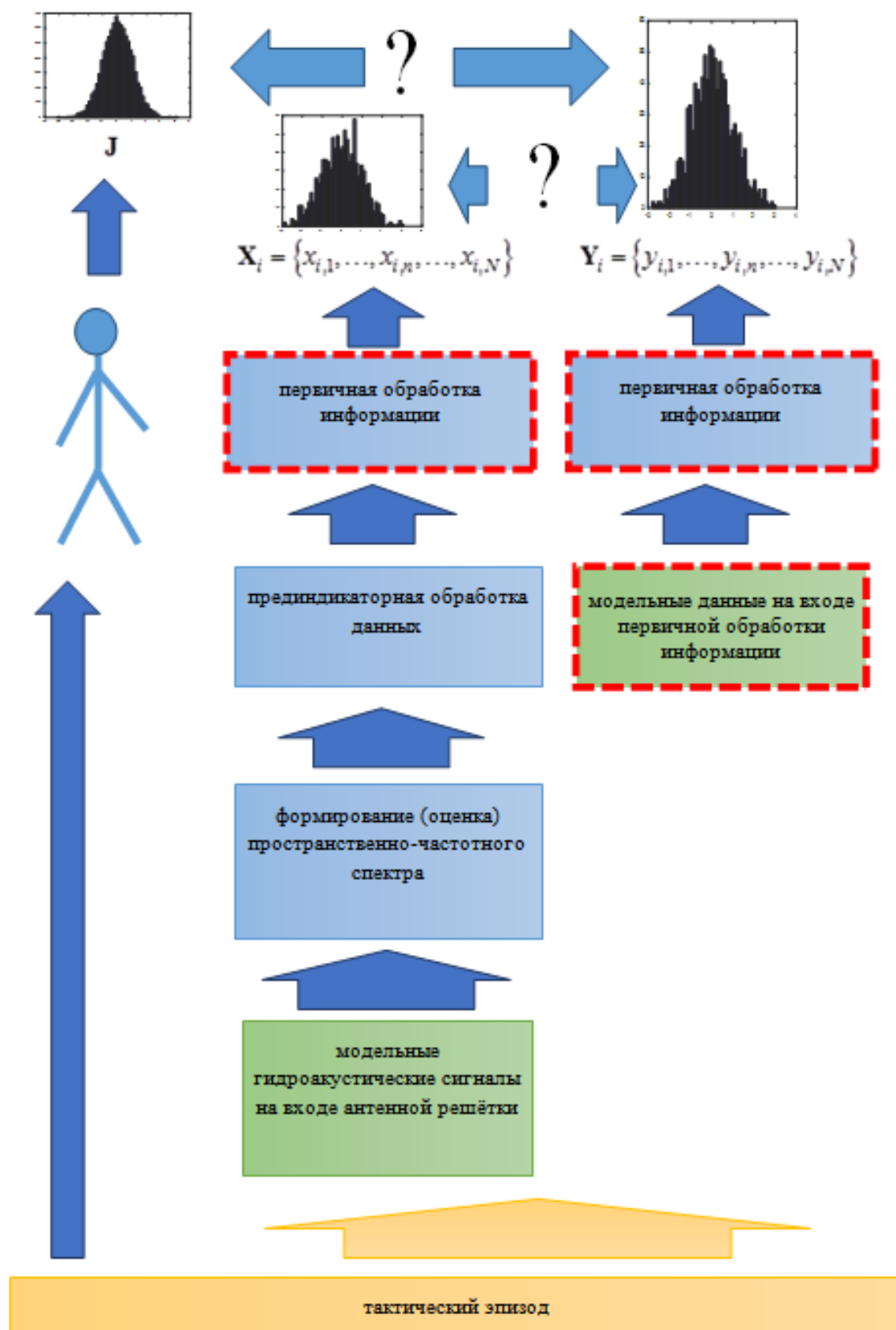


Рис. 3. Итерационный метод обработки имитационной модели и штатного ПО

более императивного, наиболее удалённого вниз по уровню, отработанного имитатора, $\mathbf{A}$ – передаточная функция «адекватного» декларативного имитационного ПО модельных данных на входе первичной обработки, $\delta\mathbf{A}$ – «погрешность» работы имитационного ПО.

2) при отсутствии цепочки, работающей от проверенного императивного имитационного ПО, в нашем распоряжении остаётся только экспертно задаваемая функция распределения вектора $\mathbf{J} = f(x)$.

Решение задачи, по необходимости, лежит в итерационной отработке одновременно имитационного и штатного ПО, где на каждой итерации производится сопоставление заданному распределению $\mathbf{J} = f(x)$ множеств:

$\mathbf{X}_i = \{x_{i,1}, \dots, x_{i,n}, \dots, x_{i,N}\}$ – для устранения $\delta\mathbf{b}$ и

$\mathbf{Y}_i = \{y_{i,1}, \dots, y_{i,n}, \dots, y_{i,N}\}$ – для устранения $\delta\mathbf{A}$. Критерием останова отладки в данном случае служит (1). При отсутствии императивной цепочки разделение $\delta\mathbf{A}$ и $\delta\mathbf{b}$ затруднительно и производится экспертными методами – совместно разработчиками штатного и имитационного ПО.

Описанный случай, очевидно, упрощается при наличии адекватного декларативного имитатора и сводится к процессу отладки штатного ПО.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обоснован подход к оценке адекватности имитационного программного обеспечения, служащего для упрощения отработки многоуровневого штатного ПО. Подход позволяет осуществлять аттестацию имитаторов, реализуемых в виде программно-аппаратных комплексов [6], как стандартную процедуру [11].

Возможность объективной оценки адекватности имитационного ПО открывает пути создания имитационных моделей входных данных для различных уровней обработки информации в гидроакустическом комплексе, которые могут служить в качестве средства испытаний сложных гидроакустических изделий. По мере накопления данных адекватность указанных моделей должна подтверждаться или пересматриваться.

Предложенный подход открывает также принципиальную возможность оценки адекватности имитационных моделей одновременно с отработкой штатного ПО. Указанная возможность реализуется в рамках итерационной процедуры, для чего необходимо исследовать и формализовать требования к допускаемому уровню несовершенства штатного программного обеспечения на каждом шаге итерации.

Благодарности

Работа выполнена благодаря поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-08-00082).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шафранюк А.В., Грановский В.А., Прокопович В.В., Беляева В.В., Требования к синтезу моделей пассивных ГАС в связи с проблемой их аттестации // Материалы конференции «УМАС-2018». – 2018. – С. 367-375.
- [2] Шафранюк А.В., Прокопович В.В., Подход к построению универсального имитационного программного обеспечения в интересах отработки технических и алгоритмических решений в гидроакустике // Материалы конференции «УМАС-2016». – 2016. – С. 257-266.
- [3] Шафранюк А.В. Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – СПб.: ЛЕМА. – 2016. – С. 314-316.
- [4] Шафранюк А.В., Прокопович В.В., Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – СПб.: ЛЕМА. – 2018. – С. 585-588.
- [5] Прокопович В.В., Сравнение декларативного и императивного подходов к моделированию гидроакустических систем // Материалы конференции «УМАС-2018». – 2018. – С. 376-383.
- [6] Машошин А.И., Шафранюк А.В. Программно-аппаратный комплекс для моделирования распределенных систем подводного наблюдения. – Материалы 8-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления, Дивноморское, 28 сентября – 3 октября 2015г., том 3, с.193-196.
- [7] Лагутин М.Б. Наглядная математическая статистика. 2-е изд., испр. – М: Бином, 2009, 472 с.
- [8] Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М: Наука, 1983, стр. 83.
- [9] Грановский В.А., Сирая Т.Н., Проблема адекватности моделей в измерениях... // Датчики и системы, №10, 2007 г., с. 52-62.
- [10] Сирая Т.Н., Вопросы адекватности метрологических моделей при исследовании систематических погрешностей измерительных и навигационных устройств // Материалы Шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. СУДОМЕТРИКА-2016», 2016 г., с. 261-266.
- [11] ГОСТ Р 8.568-2017 ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения.

Оценка погрешности определения параметров экранирования защитных оболочек на этапе их проектирования

О. К. Епифанов, И. А. Салова
ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
г. Санкт-Петербург, Россия
office@eprib.ru

Аннотация — На работоспособность электронных и электротехнических устройств в ряде применений существенно влияет внешнее высокоинтенсивное переменное магнитное поле. Его ослабление зависит от геометрических и физических параметров экранирующих защитных оболочек, точность определения которых на этапе их проектирования является одной из первостепенных задач. Расчетная оценка и анализ электромагнитной обстановки в месте размещения вышеуказанных устройств, а также численные значения параметров таких оболочек и эффективность экранирования могут быть выполнены на этапе их проектирования методом конечно-элементного численного моделирования. В докладе рассмотрены факторы, определяющие точность и достоверность результатов имитационного компьютерного моделирования указанным методом экранирующих свойств защитных оболочек и их численных значений в условиях воздействия внешнего высокоинтенсивного переменного магнитного поля.

Ключевые слова — экранирование; защитная оболочка; численное моделирование; достоверность; точность

1. ВВЕДЕНИЕ

Тенденции развития ряда высокоэнергетических механизмов и силового электропривода предполагают непосредственное (встраиваемое) размещение в их конструкциях точных электронных и электромеханических устройств систем автоматического управления [1-4], которые должны быть работоспособны в полной мере в условиях воздействия на них внешних высокоинтенсивных переменных магнитных полей (ВПМП). Реализация аналого-цифровых электронных и преобразующих электротехнических составных частей в конструкции этих устройств [4-7] предполагает выполнение для них защитных экранирующих оболочек от воздействия ВПМП при эксплуатации. Количественно эффективность экранирования такими оболочками характеризуется отношением напряженности магнитного поля (А/м) в защищаемой области внутри приборного пространства при отсутствии оболочки и при ее наличии. Эффективность экранирования на этапе проектирования зависит от точного и достоверного определения геометрических и физических параметров экранирующих оболочек - экранов. Расчетная оценка параметров и анализ электромагнитной обстановки может выполняться путем компьютерного конечно-элементного 2D-3D численного моделирования ВПМП средствами специализированного программного обеспечения (СПО) [8-10] с соответствующим определением

параметров остаточного переменного электромагнитного поля внутри экранируемых конструкций и степени его ослабления защитной экранирующей оболочкой. Существуют, по крайней мере, три фактора, которые непосредственно определяют точность и достоверность результатов расчетного анализа: равномерность задаваемого однонаправленного ВПМП; плотность сетки конечных элементов, описывающих исследуемую геометрическую область; электрические и магнитные свойства материала экранирующей защитной оболочки.

II. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЗАДАНИЕ ВПМП

Точность определения параметров экранирующей защитной оболочки с точки зрения достижения ее максимальной эффективности существенно зависит от характера моделируемого источника ВПМП в исследуемой геометрической области, который может быть создан средствами СПО как удаленным, так и приближенным, имеющим конечные размеры, согласно рис. 1. Такой приближенный источник, как правило, является протяженным источником электромагнитного поля - проводящим цилиндром с током или точечным источником электромагнитного поля с током. В случае удаленного источника в осесимметричной постановке на границе 2 (рис. 1,а) устанавливается значение магнитного потока, с заданной ве-

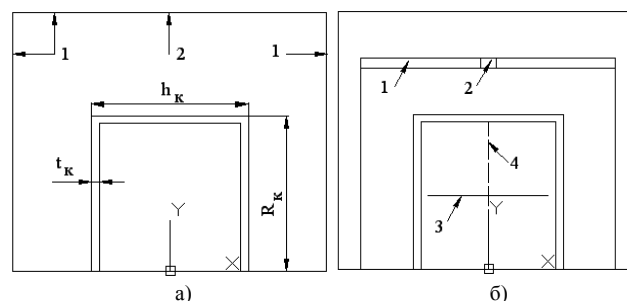


Рис. 1. Геометрическая область с источниками ВПМП:

а) с удаленным источником ВПМП: 1 - граница принятой геометрической области ВПМП; 2 - граница для задания величины напряженности ВПМП;

б) с проводящим цилиндром с током и точечным источником для генерации ВПМП: 1 - проводящий цилиндр; 2 - точечный источник; 3 и 4 - контуры для определения величины напряженности.

личины его напряженности. Аналогично, для геометрической области, изображенной на рисунке 1,б, при создании ВПМП проводящим цилиндром 1 или точечным источником 2 величина плотности электрического тока в

них задается соответствующей требуемой величине его напряженности. Для создания ВПМП в случае протяженного источника используется проводящий цилиндр, когда его линейные размеры превосходят размеры корпуса устройства с его защитной оболочкой в 1,5-2 раза. Точечный источник ВПМП создается тем же проводящим цилиндром, когда его линейные размеры меньше, по крайней мере, в 10 раз, чем размеры защитной оболочки устройства. В зависимости от выбранного из вышеуказанных трех способов создания ВПМП в исследуемой геометрической области, равномерность его распределения и средние значения напряженности магнитного поля различны. Это приводит к погрешности задания установленной исходными данными значения напряженности ВПМП в исследуемой геометрической области, как например при задании напряженности $H=750$ А/м с частотой 50 Гц (рис.2). Из графиков, приведенных на рис.2 следует, что при способе задания граничных условий для удаленного источника магнитное поле создается равномерным внутри всей области, где будет располагаться проектируемое устройство. При создании ВПМП за счет протекания тока в проводящем цилиндре напряженность распределяется неравномерно как по горизонтали, так и по вертикали (контуры 3 и 4 на рис.1,б), причем точечный источник поля создает значительную неравномерность, что приводит к недостоверности получаемых в дальнейшем результатов моделирования.

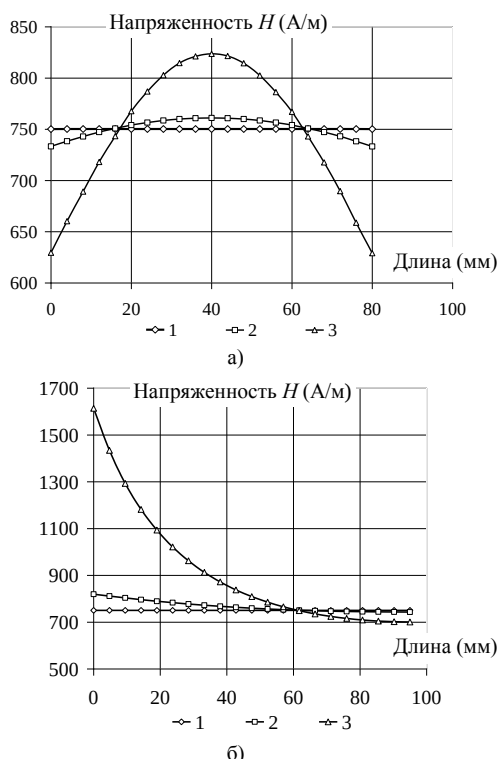


Рис. 2. Графики изменения напряженности ВПМП вдоль контуров согласно рис.1,б: а) - 3; б) - 4; при задании: 1 - удаленным источником; 2 - протяженным проводящим цилиндром; 3 - точечным источником.

Таким образом, из вышеизложенного следует, что максимальная погрешность в задании напряженности ВПМП (графики на рис. 2) для точечного источника может составлять до 40 % от его требуемого номинального значения, для проводящего цилиндра – до 2 %, для удаленного источника – менее 0,1 %.

III. Влияние плотности сетки конечных элементов

Первоначальная генерация сетки конечных элементов в среде СПО в процессе моделирования, как правило, выполняется автоматически и характеризуется количеством элементов сетки в заданной геометрической области по внутреннему алгоритму СПО. На рис. 3,а приведен, в качестве иллюстрации, график распределения вдоль контура 3 (рис.1,б) напряженности остаточного переменного магнитного поля H_3 в экранируемой области (внутри защитной оболочки) при указанной автоматической генерации. В этом случае при первоначальной генерации сетки среднее значение напряженности остаточного магнитного поля внутри защитной оболочки по контуру 3 составило $H_3=28,2$ А/м, а коэффициент экранирования K_3 , определяемый отношением величины напряженности $H=750$ А/м к среднему значению H_3 , составил $K_3 \approx 28$. При уплотнении сетки приблизительно в 3 раза график распределения напряженности переменного электромагнитного поля вдоль контура 3 соответствует рисунку 3,б, а его среднее значение внутри защитной оболочки по контуру 3 составило $H_3=1,04$ А/м, что приблизительно в 28 раз меньше первоначального значения.

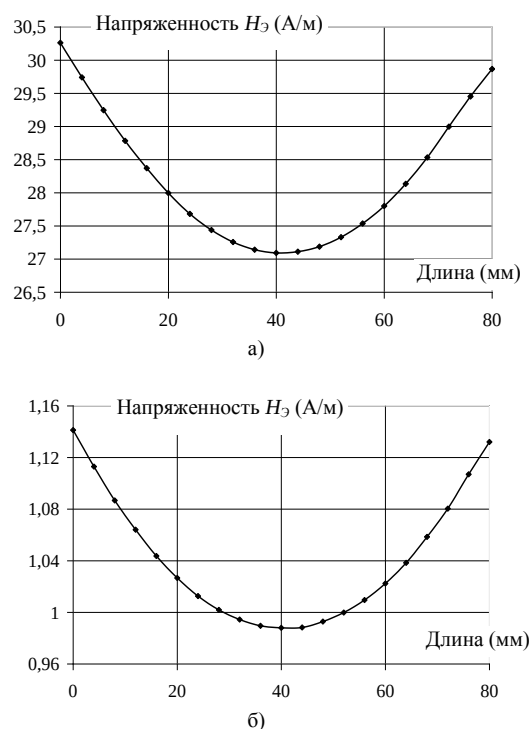


Рис. 3. Распределение напряженности переменного магнитного поля H_3 вдоль контура 3: а) - при первоначальном разбиении сетки конечных элементов; б) - при уплотнении сетки конечных элементов в 3 раза.

Это связано с точностью вычисления плотности вихревых токов по толщине ферромагнитной защитной оболочки (толщине корпуса t_k) в процессе моделирования в среде СПО, что проиллюстрировано на рис. 4, где кривая 1 соответствует исходному разбиению сетки, при котором возникают существенные погрешности при вычислении вихревых токов, а кривая 2 – третьему шагу уплотнения сетки.

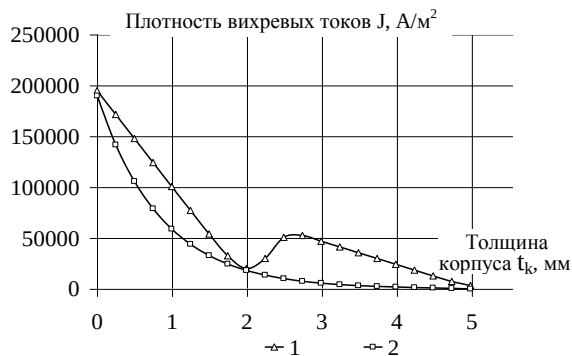


Рис. 4. Изменение плотности вихревых токов по сечению корпуса (его толщине t_k) при различной плотности разбиения сетки: 1 – исходное разбиение сетки; 2 – уплотнение сетки.

При переменном магнитном поле в ферромагнитной защитной оболочке, имеющей достаточно высокую электропроводность, глубина проникновения вихревых токов δ меньше ее толщины и уменьшается с ростом частоты поля f [11, 12]. При автоматическом разбиении сетки конечных элементов по толщине защитной оболочки генерируется недостаточное число слоев сетки, что и приводит к существенным погрешностям при вычислении значений плотности вихревых токов, и как следствие, к неверным результатам определения напряженности внутри оболочки. Результаты получены при номинальных значениях относительной магнитной проницаемости электротехнической стали $\mu=1000$ и удельной электрической проводимости $\gamma=7040000$ См/м [13].

В процессе технологической обработки защитных оболочек (корпусов) указанные значения μ и γ могут изменяться.

IV. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

Поскольку магнитомягкие стали и сплавы, из которых преимущественно изготавливаются конструкции рассматриваемых корпусов вышеупомянутых устройств, подвергаются технологической обработке в процессе производства, в частности, механической обработке, то их магнитные и электрические свойства, как правило, ухудшаются относительно нормативных значений: по μ – до 3 раз, а по γ – до 1,5 раз. Проведение анализа влияния изменений μ и γ , характеризующих свойства ферромагнитного материала корпуса проектируемого устройства на его экранирующую способность, позволяет, в конечном итоге, определить более достоверное и точное значение толщины корпуса при принятом способе производства и его минимизировать с точки зрения достаточности, при котором достигается требуемое значение H_z . В качестве примера, для геометрической модели корпуса устройства (рис.1,а), на рис. 5 и 6 приведены полученные по результатам моделирования соответственно зависимости средних значений напряженности H_z внутри защитной оболочки и глубины проникновения δ ВПМП по ее толщине для различных значений μ и γ при напряженности $H=750$ А/м частоты 50 Гц.

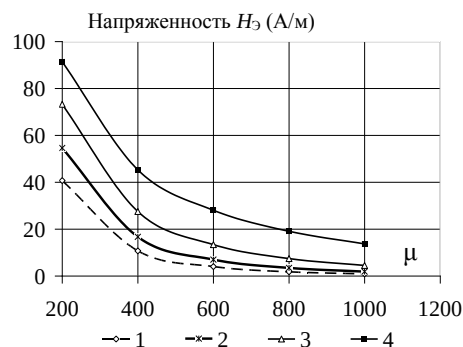


Рис. 5. Зависимость напряженности H_z внутри защитной оболочки от μ и γ : 1 - $\gamma=7040000$

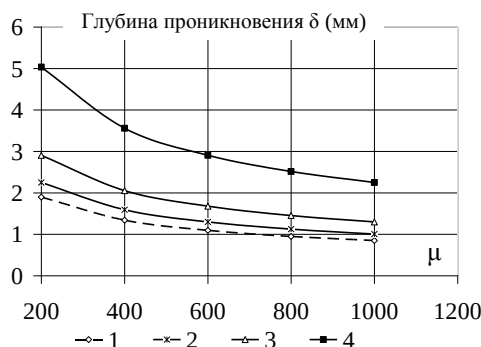


Рис. 6. Зависимость глубины проникновения переменного магнитного поля от μ для частоты $f=50$ Гц: 1 - $\gamma=7040000$ См/м; 2 - 5000000 См/м; 3 - $\gamma=3000000$ См/м; 4 - $\gamma=1000000$ См/м.

Из полученных результатов (рис. 5 и 6) следует, что ошибка в определении H_z при недостоверном значении μ может составлять до 10 раз и более несмотря на то, что неточность в определении δ не превышает двух раз. При этом влияние на точность определения H_z недостоверного значения γ можно считать прямо пропорциональным.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог вышеизложенному можно отметить, что, по крайней мере, три фактора при компьютерном конечно-элементном численном моделировании переменных магнитных полей и экранирующих свойств защитных оболочек устройств существенно влияют на точность и достоверность результатов моделирования, а именно:

- способы задания ВПМП, определяющие его равномерность;
- плотность построения сетки конечных элементов, связанную с числом ее узлов;
- достоверность значений магнитных и электрических свойств магнитомягких материалов, используемых при моделировании конструкций экранирующих корпусов.

Изложенные в докладе подход и методика анализа факторов, определяющих точность и достоверность результатов определения параметров экранирования защитных оболочек при использовании для этого средств компьютерного конечно-элементного 2D-3D численного моделирования, не являются исчерпывающими, но являются достаточными для практического применения при проектировании конструкций корпусов устройств – как защитных экранирующих оболочек для широких диапазонов напряженности и частоты ВПМП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дядик А.Н., Никифоров Б.В. Корабельные энергетические системы/ Центральное конструкторское бюро морской техники "Рубин".- Новочеркасск: Лик, 2012. 678 с.
- [2] Пешехонов В.Г., Гутнер И.Е., Зиненко В.М., Савик В.Ф., Янушкевич В.Е. Перископный комплекс «Парус-98» // Гироскопия и навигация. 2005. № 1(48). С. 5–15.
- [3] Мкртычян А. Р., Башкеев Н. И., Якимовский Д. О., Акашев Д. И., Яковец О.Б. Современное состояние и перспективы развития силовых гироскопических комплексов // Гироскопия и навигация. 2015. № 1 (88). С. 93–99.
- [4] Медведев А.В., Молочников А.А., Епифанов О.К., Орлов М.В. Система пространственной стабилизации линии визирования головной призмы подвижного объекта // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Вып.7. С. 275–284.
- [5] Епифанов О.К. Комплексирование электромеханических и электронных частей в малогабаритных цифровых преобразователях угла типа «угол-параметр- код» // Материалы 1-ой Всероссийской научно-практической конференции "Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах" (г.Ульяновск, 6-10 сентября 2011 г.). Ульяновск: УлГТУ, 2011. С. 162–164.
- [6] Епифанов О.К., Зиненко В.М., Аксененко В.Д. и Молочников А.А. Комплексные решения высокоточного цифрового преобразования угловых перемещений в аппаратуре межотраслевого применения // Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции «Датчики и системы – 2006». Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИ физических измерений», 2006. С. 263–273.
- [7] Аксененко В.Д., Епифанов О.К. Новое поколение высокоточных цифровых преобразователей угла // Измерительная техника. 2013. № 3. С. 15–19.
- [8] Клявин А. ANSYS.Inc: Современные методы моделирования электромагнитного поля // САПР графика. 2011. №6. С. 52–55.
- [9] Программный продукт ELCUT v.5.9. СПб: Производственный кооператив "ТОР", 2013.
- [10] Епифанов О.К., Салова И.А. Моделирование и оценка электромагнитной устойчивости электромеханических устройств к электромагнитным полям и помехам методом конечных элементов //Материалы XXIX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ»Электронприбор», 2014. С. 398–402.
- [11] Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. 112 с.
- [12] Ламмеранер Й., Штафль М. Вихревые токи. М.-Л.: Энергия, 1967. 208 с.
- [13] Шматко О.А., Усов Ю.В. Структура и свойства металлов и сплавов. Электрические и магнитные свойства металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1987. 584 с.