



---

ВОСЬМАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ  
В СУДОСТРОЕНИИ  
И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ

**СУДОМЕТРИКА**  
2022

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

25-27 ОКТЯБРЯ 2022 г.  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

---



---

ВОСЬМАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ  
В СУДОСТРОЕНИИ И СМЕЖНЫХ ОТРАСЛЯХ**  
**СУДОМЕТРИКА-2022**

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Санкт-Петербург  
25-27 октября 2022 г.

---

УДК 08

Материалы Восьмой Всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2022)» / ред. В. А. Грановский. – СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022.– 137 с.

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

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

© АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»: 2022

---

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Современное законодательство в области обеспечения единства измерений и его развитие в интересах метрологических служб предприятий ОПК	
А. С. Кривов .....	6
Компетентность метрологических подразделений и оценка квалификации персонала	
А. В. Мосичкина, Б. Я. Литвинов, М. В. Окрепиллов.....	8
Метрологическое обеспечение процессов технического обслуживания функциональных судовых систем	
Н. Н. Скориантов, Н. Е. Кочугуров, Р. Н. Целмс, В. Г. Агафонов.....	11
Особенности поверки измерительных систем объектов вооружения и военной техники военно-морского флота	
А. Г. Максак , А. А. Горбачев , В. В. Супрунюк , Ю. А. Кувыкин, А. Н. Ольховский.....	15
О классификации методик измерений и формах подтверждения их соответствия установленным требованиям	
А. А. Тумилович, А. Г. Чуновкина.....	17
Расширение моделей данных с целью обеспечения эффективности результатов измерений	
Т. Н. Сирая.....	23
Технические особенности средств метрологического обеспечения комплексированных навигационных систем	
Н. А. Панёвкин, В. П. Серафимов .....	28
Опыт проведения метрологических экспертиз изделий военной техники	
В. В. Беляева, Т. Н. Сирая.....	31
Цифровизация процесса создания новых функциональных материалов для управляющих систем	
И. В. Лихачёв .....	34
Выбор допусков на компоненты новых функциональных материалов в условиях цифровизации	
О. А. Елисеева, А. В. Марков .....	36
Технические средства для межлабораторных сличений при измерениях вносимых помех в бортовое электропитание	
А. П. Смирнов, Ф. Г. Колдашов, Е. А. Смирнова.....	39
Способы оценки метрологических характеристик пьезоэлектрических измерительных преобразователей механических колебаний без демонтажа с объектов эксплуатации	
Ю. А. Кувыкин, В. В. Супрунюк, А. Г. Максак, А. А. Горбачев .....	42
О влиянии ошибок округления на обеспечение корректности выводов в задачах проверки статистических гипотез	
Б. Ю. Лемешко .....	49

---

Эргодические свойства сигналов и обработка данных при измерениях	
Т. Н. Сирая.....	63
Стандартизация бесплатформенных инерциальных навигационных систем морского применения: первые результаты	
В. В. Беляева, В. А. Грановский.....	68
Возможности ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» по передаче единицы длины датчикам линейных перемещений	
Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалёв, А. Л. Сизов, В. П. Филиппов, З. В. Фомкина, А. Д. Куркова .....	71
Современное состояние измерений мер длины концевых плоскопараллельных интерференционным методом	
Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, Е. И. Логвинюк, К. В. Чекирда.....	74
Разработка комплекса современных рабочих и вторичных эталонов единиц магнитных величин	
А. Н. Пронин, И. С. Хасиев .....	77
Сравнительные испытания модемов звукоподводной связи	
А. И. Машошин, А. В. Шафранюк.....	82
Качество и надёжность технологических систем	
В. Г. Стрельцов .....	86
Устройство для измерений угла поворота на основе голографической меры: исследование стабильности и калибровка	
К. С. Гороховский, В. А. Грановский .....	88
Измерительная система с дистанционной передачей измерительных данных для испытаний моделей кораблей и судов	
В. Г. Агафонов, Н. Е. Кочугуров, Н. Н. Скориантов, Р. Н. Целмс.....	92
Реализация стационарного режима измерения температуры при определении теплопроводности теплоизоляторов в условиях априорной неопределенности	
Н. М. Чжо, А. А. Лупачёв, В. В. Пойда, А. Р. Пецинярж .....	95
Проблемы метрологического обеспечения создания оптических систем навигационных устройств	
Н. Л. Яворовская, Т. Н. Сирая .....	101
Особенности оценки погрешности воспроизведения волноводным стендом ударного ускорения при испытаниях ударостойкости электронных компонентов	
А. Ю. Колыванов .....	105
К вопросу разработки методики контроля работоспособности секстанов СНО-Т	
В. Г. Агафонов, Н. Н. Скориантов, Р. Н. Целмс .....	108
Метрологическое обеспечение систем вибрационного мониторинга для оценки технического состояния роторного оборудования	
В. Г. Агафонов, Н. Е. Кочугуров, Н. Н. Скориантов, Р. Н. Целмс.....	111

---

---

Цифровизация процесса обеспечения производства средствами измерений и контроля	
И. Л. Юнаков.....	115
Датчики силоизмерительные тензорезисторные ТВ на усилия от 10 кН до 3 000 кН	
И. А. Емельянов, О. А. Юранев.....	120

# Современное законодательство в области обеспечения единства измерений и его развитие в интересах метрологических служб предприятий ОПК

А. С. Кривов

Комитет по промышленной политике РСПП  
АНО «Центр «Квалитет»  
г. Москва, Россия

**Аннотация** — Представлены результаты анализа развития законодательства в области обеспечения единства измерений за последнее десятилетие. Актуальные задачи дальнейшего развития рассматриваются в рамках текущих изменений экономических условий и технологических вызовов для предприятий ОПК. Законодательное (правовое) регулирование представлено как часть общей системы нормативного регулирования и управления метрологической деятельностью предприятий на отраслевом, корпоративном и производственном уровне.

**Ключевые слова** — предприятие, законодательство, развитие, деятельность, метрологический, экономический, производственный, регулирование, управление.

Отечественное метрологическое законодательство начиная с 90-х годов прошлого столетия подвергается серьезным изменениям, вызванным потребностями развития экономики и государства в целом. Если до последнего десятилетия XX века мы имели дело с государственным управлением метрологической деятельностью административными методами, то в середине 90-х – перешли на государственное регулирование при централизации основных функций управления в едином национальном органе. Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» 2008 года открыл новый этап развития прикладной метрологии – государственное регулирование значительной части метрологических работ на правовой основе. Проблемы этой трансформации метрологической практики проявились в том, что целый ряд предусмотренных нормативных актов были приняты лишь спустя десять лет после принятия закона. Текущая дискуссия и содержание одобренного экспертным и деловым сообществом законопроекта об изменениях в федеральном законе характеризуют новый этап развития и, одновременно, ставят стратегические задачи на перспективу.

Последние новации метрологического законодательства появились в рамках активного взаимодействия федеральных органов власти и экспертного и делового сообщества, в т.ч. представителей предприятий ОПК. К таким новациям можно отнести серьезные изменения содержания и порядка метрологического надзора, который удалось сохранить на федеральном уровне. Принятые изменения соответствуют общей государственной политике контрольно-надзорной деятельности, предусматривают понятный и прозрачный подход к проведению надзорных

мероприятий и снижают нагрузку на бизнес. Другим новшеством следует признать неоднозначную по последствиям попытку сформировать единый перечень измерений с указанием норм точности, выполняемых в сфере государственного регулирования, и его утверждение правительственным постановлением. Сформированный без методической основы этот перечень, состоящий из нескольких сотен позиций, уже с первых месяцев применения вызвал вопросы у практиков, а спустя год – уже требует внесения в него изменений.

Правоприменительная практика метрологических норм и правил в условиях меняющейся социально-экономической обстановки, технологические вызовы стали предпосылкой для дискуссии последних двух лет. Эта дискуссия привела к появлению законопроекта, содержащего ряд важных нововведений. Они касаются:

- уточнения сферы государственного регулирования в области обеспечения единства измерений,
- аттестации методик измерений,
- порядка оценки соответствия технических систем с измерительными функциями,
- применения средств измерений,
- признания компетентности юридических лиц проводить поверку средств измерений и выполнять другие метрологические работы.

В ходе обсуждения указанных изменений были подняты проблемы развития законодательства, которые пока не находят согласованных решений. Такие системные вопросы, как единая политика в законодательствах по метрологии, техническому регулированию и аккредитации, единообразии форм оценки соответствия средств измерений, упрощение объектной и предметной области регулирования, приоритет технических требований и сокращение затрат на непрофильные для метрологических служб работы по менеджменту процессов, предлагается сделать основными направлениями обсуждений стратегии развития законодательства на следующее десятилетие.

**Abstract** — Analysis results of legislation development in the field of measurement unity assurance for the last decade are presented. Actual problems of the future development are considered in the framework of economic con-

**ditions current changes and technological challenges for enterprises, particularly those of a defence industry. The legislative (normative) regulation is presented as the part of common system of normative regulation and managing of metrological activity in enterprises at the branch, corporative, and technological levels..**

*Key words – enterprise, legislation, development, activity, metrological, economic, technological, regulation, managing.*



# Компетентность метрологических подразделений и оценка квалификации персонала

А. В. Мосичкина, Б. Я. Литвинов, М. В. Окрепилов  
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: a.v.mosichkina@vniim.ru

**Аннотация** — В докладе проведен анализ нормативных документов, характеризующих требования к персоналу метрологических подразделений. Рассмотрен вопрос формирования трудовых функций при разработке профессиональных стандартов в области метрологии и метрологического обеспечения на примере процедур калибровки и поверки, аттестации испытательного оборудования. Освещена необходимость анализа проблемных вопросов, связанных с согласованием требований нормативных документов, предъявляемых к сотрудникам метрологических служб и реальных потребностей организаций и предприятий. Рассмотрен вопрос разделения трудовых функций и трудовых действий специалистов в различных видах деятельности, осуществляемых специалистами-метрологами. Раскрыты аспекты применения положений профессиональных стандартов при разработке профессиональных квалификаций и оценочных средств, применяемых для процедуры независимой оценки квалификации.

**Ключевые слова** – профессиональный стандарт, калибровка, поверка, трудовая функция, квалификация.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Вопросам компетентности метрологических подразделений, лабораторий уделяется большое внимание. При этом, важным аспектом является оценка компетентности и квалификации сотрудников этих подразделений. В частности, требования к персоналу содержит стандарт ГОСТ ISO/IEC 17025—2019 (6.2 Персонал, с.4) [1]. Согласно требованиям стандарта лаборатория должна гарантировать, что персонал обладает компетентностью для выполнения лабораторной деятельности, за которую он несет ответственность, и для оценки значимости отклонений [1]. Дать гарантии можно только в том случае, если существует процедура контроля квалификации персонала, а это, в свою очередь, требует разработки соответствующих критериев для оценки квалификации. Необходимость разработки новых инструментов для описания квалификаций привела к разработке и применению профессиональных стандартов (ПС) [2]. Разработка ПС проводится и в сфере метрологической деятельности [3].

Независимо от отраслевой специфики выдерживается единая методология и логика разработки ПС, выделяются обобщенные трудовые функции (ОТФ) включающие несколько трудовых функций (ТФ) [2]. Здесь и возникают основные трудности. Предполагается, что в формировании ТФ и определении трудовых действий в рамках каждой ТФ, основную роль должны играть потенциальные работодатели. Но их мнения часто различны настолько, что это затрудняет возможность формировать консенсус, необхо-

димый для разработки и утверждения ПС. В частности, дополнительное обсуждение требуют ТФ и трудовые действия, связанные с калибровкой и поверкой средств измерений (СИ), а также аттестацией испытательного оборудования (ИО). И в том и другом случае присутствует собственно процесс измерения и операция контроля, поэтому содержание упомянутых ТФ в целях формирования ПС для специалистов-метрологов целесообразно рассмотреть совместно.

## II. ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросы различия и сходства процедур поверки и калибровки СИ рассматриваются с начала 90-х годов прошлого века по настоящий момент [4]. До этого времени все СИ в России (тогда СССР) подлежали поверке и вопрос о калибровке не стоял. Исключение составляли методики работы с государственными первичными и вторичными эталонами. В качестве примера можно привести определение из ГОСТ 16263 70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения» (в настоящее время отменен), где согласно п.11.23 Калибровка меры (набора мер) поверка меры (набора мер) посредством совокупных измерений. Речь шла о калибровке мер из состава групповых эталонов.

Различие и сходство калибровки и поверки СИ часто рассматривается на основе действующих нормативных документов и приведенных там определений. При разработке ПС в целях адекватного отражения деятельности метролога целесообразно рассмотреть трудовые действия по поверке и калибровке СИ исходя из самого процесса измерений.

Измерение представляет собой процесс получения опытным путем количественной информации о свойствах объектов и явлений окружающего мира [5, 6]. Понятие об измерении (по шкале отношений) было сформулировано еще М.Ф. Маликовым [7] и звучит следующим образом: «измерение есть познавательный процесс, заключающийся в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу. Согласно приведенному определению имеем:  $Q = q [Q]$ , где  $Q$  – измеряемая величина,  $[Q]$  – единица величины,  $q$  – числовое значение измеряемой величины. Для получения результата важны оба множителя, причем единица величины (измерения)  $[Q]$  должна оставаться неизменной. Достигнуть абсолютной неизменности невозможно, но можно восполнять потерю информации о единице величины, которая связана со значениями метрологических характеристик (МХ) СИ. Для этого и проводится калибровка. Согласно РМГ 29-2013 «ГСИ. Метрология. Основные терми-

ны и определения» (п. 9.6) калибровка (средств измерений) – «Совокупность операций, устанавливающих соотношение между значением величины, полученным с помощью данного средства измерений и соответствующим значением величины, определенным с помощью эталона с целью определения метрологических характеристик этого средства измерений». Определение МХ СИ при этом служат не только для уточнения информации о единице величины, но и для последующей оценки значимости их изменений. Допустимые изменения МХ СИ нормируют, поэтому на первом этапе определяется действительное значение МХ на момент калибровки, а на втором – делается вывод о соответствии или не соответствии СИ установленным требованиям, т.е. подтверждается метрологическая исправность СИ. Особенность калибровки в сфере ответственности пользователей СИ состоит в том, что решение о соответствии (не соответствии) может принимать как подразделение, проводившее калибровку, так и сам пользователь СИ. В сфере государственного регулирования в области обеспечения единства измерений оба этапа калибровки объединяются в один процесс, который называют поверкой СИ. Проводить поверку могут только метрологические лаборатории, аккредитованные на этот вид деятельности. С точки зрения законодательной метрологии различия есть, но с точки зрения квалификации, выполняемых метрологом ТФ и трудовых действий различий нет. Поэтому нет оснований для разделения в ПС трудовых функций по поверке и калибровке СИ. Главное, это обеспечение такого состояния СИ, при котором они проградированы в узаконенных (допущенных к применению) единицах, а их МХ соответствуют нормам. Согласно упомянутому выше ГОСТ 16263-70 это соответствует понятию единообразия СИ.

СИ предназначены для получения измерительной информации, поэтому контролем состояния СИ и его МХ должен заниматься метролог. ИО предназначено для других целей. Согласно [8] испытательное оборудование: Средство испытаний, представляющее собой техническое устройство для воспроизведения испытаний. Но стандарт [9], в котором регламентируются вопросы аттестации ИО, был отнесен к государственной системе обеспечения измерений. На основании этого многими представителями потенциального работодателя к ТФ для включения в ПС для специалиста по метрологии относят аттестацию ИО. Но, согласно основному назначению ИО его аттестацией должен заниматься специалист по испытаниям, поскольку именно он осуществляет процессы испытаний и контроля продукции. Метролог отвечает за метрологическую исправность измерительных каналов, которые входят в состав ИО для количественной оценки условий испытаний, реализуемых конкретным ИО. Контроль собственно ИО как технического средства в его функции входить не должен. Пункт 3.7 стандарта, который устанавливает основные положения метрологического обеспечения измерений [10] устанавливает, что метрологическое обеспечение объекта метрологическое обеспечение измерений, выполняемых на объекте. А пункт 3.6. того же стандарта устанавливает, что метрологическое обеспечение измерений систематизированный, строго определенный набор средств и методов, направленных на получение измерительной информации, обладающей свойствами, необходимыми для выработки решений по приведению объекта управления в целевое состояние. Из этого следует, что оценивать состояние ИО как объекта управления, принимать решение о его

состоянии, проводить аттестацию должен специалист по испытаниям. Задача метролога – метрологическое обеспечение аттестации ИО. В этой формулировке ТФ и должна быть зафиксирована в ПС.

На современном этапе научно-технического развития возрастает потребность в реализации независимой оценки квалификаций, которая позволяет оценивать интегрированный опыт, полученный в процессе осуществления профессиональной деятельности. В этом случае положения профессиональных стандартов являются основой для разработки профессиональных квалификаций и оценочных средств, применяемых для процедуры независимой оценки квалификации. Процедура присвоения квалификаций ориентируется не столько на знания, которые способен показать работник, сколько на умение выполнять трудовые функции, используя имеющиеся знания. При этом профессиональный опыт специалиста рациональнее оценивать по узкому набору трудовых функций согласно утвержденным наименованиям квалификаций. К примеру, оценивать работы по поверке (калибровке), метрологическому надзору, испытаниям в целях утверждения типа и т. д. в рамках более «узконаправленных» профессиональных квалификаций.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эффективного внедрения системы профессиональных стандартов и процедур оценки в первую очередь необходима ориентация на законодательную основу при анализе деятельности специалистов по метрологии в различных сферах экономической деятельности, а также на сложившиеся в организациях общие подходы к деятельности метрологов. При этом необходим пересмотр проблемных аспектов, связанных с согласованием требований, предъявляемых к сотрудникам метрологических служб и реальных потребностей организаций и предприятий. По-прежнему актуальным остается вопрос разделения трудовых функций и трудовых действий специалистов в различных видах деятельности, осуществляемых специалистами-метрологами.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ ISO/IEC 17025—2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Москва, Стандартинформ, 2019.
- [2] Факторович А.А. Профессиональные стандарты как инструмент повышения качества подготовки кадров. / В сборнике: Актуальные задачи и пути их решения в области кадрового обеспечения электро- и теплоэнергетики. Труды учебно-методической конференции. 2016. С. 11-12.
- [3] Мосичкина А.В., Литвинов Б.Я., Окрепилов М.В. Вопросы разработки и применения профессиональных стандартов в области метрологии. // Законодательная и прикладная метрология, 2022, № 3. С. 42-46.
- [4] Генкина Р.И. Калибровка и поверка - одно и то же или все же разница есть? / Химическая техника. 2017, №1. С. 6-9.
- [5] Литвинов Б.Я., Мосичкина А.В., Окрепилов М.В. Измерение, калибровка и трудовые функции метролога в условиях цифровой трансформации. / Метрологическое обеспечение инновационных технологий. IV Международный форум: сборник статей. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Санкт-Петербург, 2022. С. 139-140.
- [6] Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Часть 1. Общая теория измерений: учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2010. – 192 с.
- [7] Маликов М.Ф. Точные измерения. – Ленинград-Москва: «Стандартгиз», 1935. – 134 с.

- [8] ГОСТ 16504-81 Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. Издательство стандартов, 1981, Стандартинформ, 2011.
- [9] ГОСТ Р 8.568 2017 Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. Москва, Стандартинформ, 2019.
- [10] ГОСТ Р 8.820 2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения. Москва, Стандартинформ, 2019.

**Abstract** — The report analyzes the normative documents that characterize the requirements for the personnel of metrological divisions. The issue of the formation of labor functions in the development of professional standards in the field of metrology and metrological support is considered on the example of calibration and verification procedures, certification of test equipment. The necessity of analyzing problematic issues related to the harmonization of the requirements of regulatory documents for employees of metrological services and the real needs of organizations and enterprises is highlighted. The issue of separation of labor functions and labor actions of specialists in various types of activities carried out by metrologists is considered. The aspects of the application of the provisions of professional standards in the development of professional qualifications and assessment tools used for the procedure of independent assessment of qualifications are disclosed.

**Key words** — professional standard, calibration, verification, labor function, qualification.

# Метрологическое обеспечение процессов технического обслуживания функциональных судовых систем

Н. Н. Скориантов, Р. Н. Целмс  
Санкт-Петербургский государственный  
университет аэрокосмического  
приборостроения  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[skorintex@yandex.ru](mailto:skorintex@yandex.ru),  
[tselms\\_rn@pochta.tvoe.tv](mailto:tselms_rn@pochta.tvoe.tv),  
[metro-guap@yandex.ru](mailto:metro-guap@yandex.ru)

Н. Е. Кочугуров  
АО «Центральное морское  
конструкторское бюро «Алмаз»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[office@almaz-kb.ru](mailto:office@almaz-kb.ru)

В. Г. Агафонов  
Главное управление инновационного  
развития МО РФ  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация**— При переходе объекта на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию изменяется система метрологического обеспечения технического обслуживания и ремонта. В настоящее время разработан математический аппарат для осуществления оценки возможности выполнения регламента технического обслуживания и ремонта для судна в целом с учётом занятости экипажа. В статье разработана структурно-функциональная электронная модель судна. Создана математическая модель восстановления технической готовности функциональных судовых систем. Рассмотрены варианты моделирования функциональных судовых систем.

**Ключевые слова** — система технического обслуживания и ремонта, функциональная судовая система, электронная модель, моделирование процессов

В современных условиях при изменении системы технического обслуживания и ремонта (далее – ТОиР) объектов с целью перехода на эксплуатацию по фактическому техническому состоянию изменился подход к комплектации объекта экипажем и обслуживающим персоналом. При переходе на эксплуатацию объекта по фактическому техническому состоянию на 25 % снизился объём затрат на проведение ТОиР [1].

В настоящее время в качестве основного показателя для оценки эффективности системы эксплуатации объектов принят коэффициент технической готовности ( $K_{тг}$ ), представляющий собой отношение времени нахождения объекта в готовности к общему сроку службы. Следует также отметить, что до настоящего времени задача количественной оценки значений этого показателя на различных этапах эксплуатации для объекта в целом не ставилась. Коэффициент технической готовности не рассматривался в качестве основного, а эффективность эксплуатации объекта определялась через коэффициент оперативного напряжения ( $K_{он}$ ), требуемые значения которого обеспечивали количественным составом эксплуатируемых объектов.

Таким образом, в настоящее время в силу указанных объективных обстоятельств, отсутствовал математический аппарат для оценки возможности выполнения регламента ТОиР (предусмотренного инструкциями по эксплуатации и технологическими картами) для судна в целом и с учётом

занятости экипажа, а также для выявления причин, оказывающих влияние на изменение значения  $K_{тг}$ .

В настоящее время в отечественной промышленности существуют лишь методики для оценки суммарной трудоёмкости операций ТОиР с учетом регламентов отдельно взятых функциональных систем (т.е. процессы их совместного функционирования, как правило, не рассматриваются) в зависимости от располагаемых трудовых ресурсов (без учета динамики их использования). Несовершенство этих методик заключается в том, что они не позволяют учитывать вклад тех или иных факторов в увеличение или уменьшение значения  $K_{тг}$ .

Все вышеизложенное приводит к недооценке фактической трудоёмкости работ по ТОиР функциональных систем судна и, как следствие, реальное время восстановления технической готовности проектируемых систем существенно увеличивается. А это в свою очередь приводит к снижению коэффициента технической готовности функциональной системы и увеличению стоимости эксплуатации объекта.

При проведении исследований, был произведен анализ процессов технического обслуживания и ремонта функциональных систем объекта за время его эксплуатации. В результате анализа выявлено несовершенство существующего математического аппарата для оценки фактической трудоёмкости всех видов технического обслуживания и ремонта проектируемого объекта (функциональных систем), выполняемых силами экипажа и обслуживающего персонала. Так, выполненная на основании статистических данных предварительная оценка объема процедур технического обслуживания объектов показывает, что реальная трудоёмкость работ по ТОиР их технических средств, как правило, превосходит располагаемые временные и трудовые ресурсы на кораблях. Как следствие, выполнять техническое обслуживание оборудования функциональных систем объекта в полном объёме не представляется возможным по причине возникающих «накладок», связанных с дефицитом времени, ресурсов, экипажа и обслуживающего персонала. В результате этого увеличивается время восстановления технической готовности оборудования, что, в конечном счете, приводит к нарушению требований инструкций технического обслуживания, и преждевремен-

ному выходу из строя энергетического оборудования. Как следствие – снижение технической готовности объекта в целом и дополнительные финансовые затраты, не учтенные на этапе проектирования (которые в зависимости от видов отказов могут быть весьма значительными).

Предварительный анализ рассмотренных выше проблем показал, что добиться эффективного снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт функциональных систем можно лишь тогда, когда с самого начала проектирования экипаж с обслуживающим персоналом и технические средства объекта рассматриваются как единая система, направленная на достижение максимальной эффективности эксплуатации энергетического оборудования [2].

Как было отмечено ранее, учитывая переход на новую систему эксплуатации объектов, в качестве основных показателей для количественной оценки эффективности их эксплуатации в статье используются  $K_{\text{т}}$  и стоимость эксплуатации (рис. 1), а также вспомогательные показатели, которые характеризуют эффективность эксплуатации объекта на уровне конкретной исследуемой функциональной системы.



Рис. 1 – Показатели эффективности эксплуатации функциональных систем.

Таким образом, для достижения целей работы, за исследуемый период для каждой функциональной системы необходимо количественно задать:

- множество  $\{T_1\}$ , описывающее время восстановления технической готовности ее оборудования;
- множество  $\{T_2\}$ , отражающее фактическое время между обслуживаниями ее оборудования;
- множество  $\{T_3\}$ , фиксирующее моменты времени перехода системы в неработоспособное состояние;
- множество  $\{T_4\}$  продолжительностей нахождения системы в неработоспособном состоянии.

По результатам проведенных исследования оценена пригодность функциональной системы к обслуживанию. В качестве критерия для выбора рациональных вариантов

функциональных систем (далее – ФС), с точки зрения их пригодности к обслуживанию, является максимум коэффициента технической готовности. При этом за исследуемый период, время восстановления оборудования функциональной системы не должно превышать заданный резерв времени [3] при заданных ограничениях на стоимость эксплуатации и ряд вспомогательных показателей:

$$K_{mi} \rightarrow \max,$$

$$\rho \leq \rho^0 < 1, t_{восст} \leq t_{восст}^0,$$

при  $t_{ij} \leq t_{ij}^0, t_{ij} \in \{T_1\},$

$$t_{мобсл} \geq t_{мобсл}^0, t_{отказ} \leq t_{отказ}^0,$$

$$c \leq c_0, m_{лс} \leq m_{лс}^0, v \leq v^0,$$

$$i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, k,$$

где  $t_{ij}$  – время восстановления технической готовности  $j$ -го элемента  $i$ -ой ФС;

$t_{ij}^0$  – заданный резерв времени, выделенный на восстановление технической готовности  $j$ -го элемента  $i$ -ой ФС;

$\rho$  – коэффициент, характеризующий загруженность обслуживающего персонала ТОиР

$c$  – стоимость эксплуатации ФС;

$t_{восст}$  – среднее время восстановления технической готовности;

$t_{мобсл}$  – среднее время между обслуживаниями;

$t_{отказ}$  – среднее время нахождения ФС в неработоспособном состоянии;

$m_{лс}$  – количество экипажа и личного состава (л/с);

$v$  – массогабаритные характеристики.

В ходе исследований осуществлена разработка структурно-функциональной (электронной) модели объекта, с целью её дальнейшего использования при решении задач интегрированной логистической поддержки (в частности, для оценки пригодности к обслуживанию функциональных систем объекта).

Описание структуры объекта выполнено на основе функциональных характеристик (структурный анализ), а определение функций системы осуществлялось в соответствии с пространственным или структурным принципом (функциональный анализ).

Структурно-функциональная (электронная) модель объекта (далее – ЭМО) включает в себя:

– множество функциональных элементов  $\{M\}$ ;

– множество членов экипажа  $\{L\}$ ;

– множество функциональных связей элементов друг с другом  $\{F\}$ ;

– множество структурно-пространственных связей элементов  $\{G\}$ .

и отображается в виде системы множеств (рис. 2).

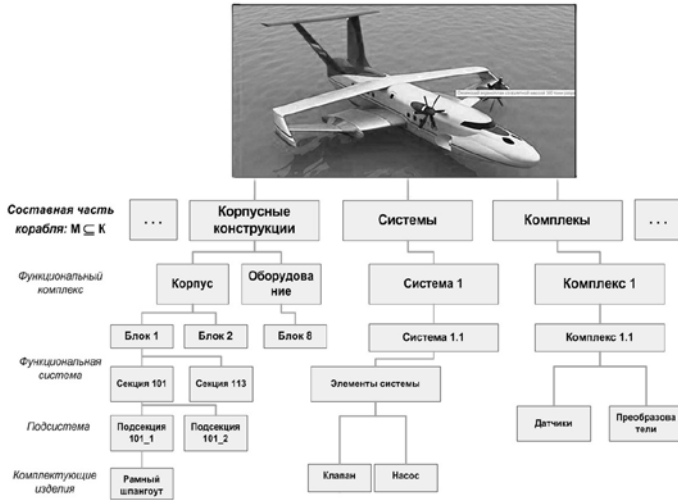


Рис. 2 – Структура электронной модели объекта.

Объект в ЭМО представлен как множество  $K$  включающее себя множество структурных элементов  $\{M\}$ ; множество функциональных связей элементов друг с другом  $\{F\}$ ; множество структурно-пространственных связей между элементами  $\{G\}$ ; множество экипажа и обслуживающего персонала  $\{L\}$ :

$$K = (\{M\}, \{F\}, \{G\}, \{L\})$$

где  $\{M\} = (\{FE\}, \{FX\}, \{GMEX\})$ ,  $\{FE \cup kFE_k\}$ ,  $k = 1, 2, \dots, k$ ,  $\{FX\} = UX_k$ ,

где  $UX_k$  – функциональные характеристики  $FE_k$ ;  $\{GMEX\}$  – геометрические и массоэнергетические характеристики  $FE_k$ .

Конечно множество связей,  $i = 1, 2, \dots, i$ , задаётся конечным множеством функциональных комплексов,  $\{FK\}$ , где каждый функциональный элемент  $FE_k$  предназначен для обеспечения работы функциональной системы  $FS_j$  и является тем материальным агрегатом, совокупность которых реализует функции данной системы. Таким образом:

$$\{F\} = (\{FK\}, \{FS\})$$

Пространственно-структурное представление объекта ( $PS$  – пространственные связи,  $P$  – помещения):  $G = (\{PS\}, \{P\})$ .

Экипаж представлен в ЭМО неким множеством  $L = (\{FP\}, \{FL\})$ , включающим в себя следующие множества:

$FP = \{fp_i\}_1^n$  – множество функциональных подразделений на объекте,

$FW = \{fw_i\}_1^n$  – множество, описывающее квалификацию л/с,

$FL = \{fl_i\}_1^n$  – множество связей с элементами множества  $\{M\}$ .

С помощью связей в данном случае определяются отношения, в которых находятся элементы объекта, то есть определяется физическое, функциональное или информационное взаимодействие элементов системы между собой. Таким образом, в результате функциональной декомпозиции можно получить представление объекта в виде функциональных элементов и их связей с функциями объекта.

В статье представлена математическая модель, описывающая процессы восстановления технической готовности функциональных систем объекта. Создана математическая модель оценки параметров функционирования системы «экипаж и обслуживающий персонал – энергетическое оборудование» на стадии проектирования. Математическая модель представляет собой исходные и выходные данные в совокупности с графической интерпретацией процесса обслуживания объекта.

Исходные данные:

1. Рассматриваемый промежуток времени:  $\Delta T \subseteq \{AT_{ij}\}$ , количество экипажа и обслуживающего персонала:  $m \subseteq \{L\}$ ;

2. Рассматриваются: функциональные системы  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $i \subseteq \{M\}$ , где  $n$  – количество функциональных систем и их элементы  $j = 1, 2, \dots, p$ ,  $j \subseteq \{M\}$ , где  $p$  – количество элементов в  $i$ -ой системе.

3. Каждый элемент системы имеет  $a_{ij} \subseteq \{FX\}$  видов ТО,  $a_{ij} = h$ , где  $h$  – общее число работ по ТО. Периодичность каждого вида ТО:  $\lambda_{aij} \subseteq \{FX\}$

4. Параметры трудоёмкости операций ТО: Трудоёмкость операций ТО:  $\tau_{aij} \subseteq \{FX\}$

5. Потребный экипаж для проведения ТО элемента системы:  $k_{aij} \subseteq \{L\}$ , время проведения операции ТО:  $t_{ij} = f(k_{ij})$ .

Выходные данные:

1.  $\{T_1\}$  – время восстановления технической готовности оборудования функциональной системы.
2.  $\{T_2\}$  – время между обслуживаниями оборудования функциональной системы.
3.  $\{T_3\}$  – момент перехода функциональной системы в неработоспособное состояние.
4.  $\{T_4\}$  – продолжительность нахождения системы в неработоспособном состоянии.

Моделирование процессов восстановления технической готовности функциональных систем осуществляется для объекта в целом, представленного в виде совокупности ФС, входящих в заведование объекта (рис. 3).



Рис. 3 – Моделирование процессов восстановления технической готовности функциональных систем.

В статье рассматриваются два состояния объекта за время его эксплуатации: время непрерывного использования и межремонтный период, каждое из которых моделируется отдельно.

Таким образом, искомая обслуживающая система состоит из конечного числа каналов обслуживания и подразумевает восстановление работоспособности оборудования функциональных систем в межремонтный период и период использования [4]. Принимаем, что рассматриваемая функциональная система включает конечное число элементов, для каждого из которых предусмотрено конечное число видов ТОиР (требований). Каждому виду ТОиР соответствуют: интенсивность наступления; трудоемкость; потребный для выполнения ТОиР и обслуживающий персонал (эти данные задаются в электронной модели объекта).

Каждый канал системы может одновременно обслуживать только одно требование. Если в момент поступления очередного требования имеются свободные каналы обслуживания, то один из них немедленно приступает к обслуживанию этого требования, если же все каналы заняты, то требование ждет, пока освободится один из них. Следовательно, если число требований, нуждающихся в обслуживании, превысит количество каналов обслуживания, то образуется очередь, дисциплина обслуживания в которой – с приоритетами [5]. При этом время ожидания в очереди не может превышать заданный резерв времени, определя-

емый вероятностью безотказной работы оборудования функциональной системы.

В представленной статье проведен систематический вычислительный эксперимент, то есть были выполнены множество независимых повторных прогонов при переходном режиме моделирования; при этом каждый повторный прогон начинался при одних и тех же начальных условиях. После завершения прогонов модели и получения статистического материала с использованием методов статистического анализа были получены точечные оценки и доверительные интервалы для средних значений искомых величин.

Определены условия, при которых обслуживание функциональных систем судна силами экипажа и обслуживающего персонала будет обеспечивать максимум их коэффициента технической готовности при заданных ограничениях на стоимость.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мишура Т.П., Скориантов Н.Н. Метрологическое обеспечение диагностических комплексов для оценки технического состояния энергетического оборудования // Датчики и Системы. 2016. № 1. С. 63-68.
- [2] Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. СПб.: Судостроение, 2001. 264 с.
- [3] Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высш. школа, 1982. 231 с.
- [4] Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
- [5] Келлерстрем Д. Математические модели в теории очередей с множественными каналами обслуживания. М.: Радио и связь, 1978. 249 с.

**Abstract** — When the facility is put into operation according to the actual technical condition, the system of metrological maintenance and repair is changed. Currently, a mathematical apparatus has been developed to assess the possibility of fulfilling the maintenance and repair regulations for the vessel as a whole, taking into account the employment of the crew. The article develops a structural and functional electronic model of the vessel. A mathematical model for restoring the technical readiness of functional ship systems has been created. Variants of modeling of functional ship systems are considered.

**Key words** — maintenance and repair system, functional ship system, electronic model, process modeling.

# Особенности поверки измерительных систем объектов вооружения и военной техники военно-морского флота

А. Г. Максак, А. А. Горбачев, В. В. Супрунюк, Ю. А. Кувыкин, А. Н. Ольховский  
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России  
г. Мытищи, Россия  
E-mail: 32gnii@mil.ru

**Аннотация** — Рассмотрены отличительные особенности поверки измерительных систем на объектах вооружения и военной техники Военно-Морского Флота в реальных условиях их эксплуатации и применения по назначению с заданными метрологическими характеристиками. Акцентировано внимание на различных подходах к подтверждению постоянства метрологических характеристик измерительных систем в процессе их эксплуатации, к обеспечению требуемого уровня автономности, устойчивости и целостности функционирования их измерительных каналов. Показаны возможные пути повышения этих уровней посредством не применяемых ранее научно-технических решений и методических рекомендаций.

**Ключевые слова** — измерительные системы, первичные измерительные преобразователи, поверка, структурная избыточность, информационная избыточность

## I. ВВЕДЕНИЕ

Предметом исследований явились возможные подходы к проведению автономной поверки распределенных измерительных систем, применяемых на объектах вооружения и военной техники (ВВТ) Военно-Морского Флота (ВМФ). В исследовании ставилась задача раскрыть особенности этих подходов при измерениях для оценки определения метрологических характеристик (МХ). Проведенные исследования состояли из этапов обобщения сведений по данной теме, их анализа и формулировки предположений по путям совершенствования процедуры автономной поверки. При этом особое внимание уделено различным подходам к подтверждению постоянства метрологических характеристик измерительных систем в процессе их эксплуатации, к обеспечению требуемого уровня автономности, устойчивости и целостности функционирования их измерительных каналов (рисунок 1).



Рис. 1 – Метрологическое обеспечение объектов ВВТ ВМФ

Под автономной поверкой подразумевается оценка МХ измерительных систем (ИС) на объектах ВВТ ВМФ без демонтажа их составных частей в местах эксплуатации.

ИС являются разновидностью средств измерений и на них распространяются все общие требования к средствам измерений [1]. ИС представляет собой совокупность измерительных (первичных измерительных преобразователей (ПИП)), связующих (коммутаторов, распределительных устройств, соединительных линий), вычислительных (ПЭВМ, вычислителей) компонентов, образующих измерительные каналы (ИК) ИС и функционирующих как единое целое.

Процедура и порядок проведения испытаний ИС требуют разработки методики поверки в условиях эксплуатации и приведены в [2]. Однако рекомендации в действующих нормативных документах, позволяющие разрабатывать указанные методики поверки ИК ИС, обеспечивающие сохранение в процессе поверки уровня автономности, устойчивости и целостности функционирования их ИК, на сегодняшний день конкретно не сформулированы. Подход к этим вопросам в каждом конкретном случае носит индивидуальный характер. При этом для ИС, установленных на объектах ВВТ ВМФ, приоритет отдается способам (процедурам) поверки ИК ИС в целом для всей структуры ИК, без демонтажа их основных элементов с объектов ВВТ ВМФ. Основной причиной к такому решению для ИС объектов ВВТ ВМФ является тот факт, что ИС являются распределенными по объекту. При этом их элементы непосредственно установлены и закреплены по всем внутренним и наружным труднодоступным частям объекта и могут включать в себя несколько сотен ИК (датчиков). Например, гидроакустические распределенные системы подводных лодок ВМФ.

Как показывает практика, при эксплуатации существующих ИС основным источником погрешности измерений ИК является ПИП. При этом, соотношение погрешностей аналоговых связующих компонентов ИС и ПИП находится на уровне не менее, чем 1/3, а для соотношения связующих компонентов на основе цифровой передачи информации и ПИП - не менее 1/7. ПИП для ИК ИС выбираются, как правило, из существующего выпускаемого модельного ряда. Следует отметить, что основополагающим критерием для выбора ПИП в состав ИК ИС должен быть не только правильный выбор их МХ, но и возможность их дальнейшей безотказной эксплуатации, а также использования их при поверке ИК ИС без демонтажа с объекта установки.



Реализация автономных процедур определения МХ ИК (поверки) должна основываться на применении следующих основных подходов:

- структурной избыточности ПИП в ИК ИС (наличие резервных каналов) [3, 4, 5];

- информационной избыточности данных о МХ ПИП [3, 4, 5];

- реализации в конструкции ПИП и (или) в ИК ИС контрольных мер, включая цифровые «константы», средств встроенного контроля.

В представленных подходах результат измерений для определения МХ оценивается:

- по одному из алгоритмов группового сравнения показаний ПИП;

- на сравнении реальных показаний ПИП с показаниями, полученными при их испытаниях;

- на сравнении с показаниями контрольных мер (цифровая/аналоговая).

При групповом сравнении, реализующим принципы применения структурной и временной избыточности, авторы предлагают использовать методические рекомендации [6], суть которых заключается в том, что вместо среднего значения измеренной величины в расчетах применяется средневзвешенное при условии определения его весовых коэффициентов, зависящих от временного дрейфа погрешности ПИП по статистическим данным модели ее ухода.

Во втором подходе предлагается использовать паспортизацию обобщенных сведений в вычислителе ИС о стабильности и вариации МХ ПИП в диапазоне рабочих условий при эксплуатации.

Наиболее перспективным, на наш взгляд представляется применение в 3-ем подходе с контрольных мер и средств встроенного контроля. Как правило, в качестве мер выступают электрические стимулирующие сигналы [7, 8]. В [9] предложено использовать цифровую меру, которая является аналогом электрического стимулирующего сигнала, но менее подвержена «искажению» в связующих компонентах ИС. Реализуют такую меру на этапе паспортизации ПИП путем ее представления как цифровой «константы» в методиках автономной поверки ИС объектов ВМФ.

Авторы отмечают, что сочетание различных комбинаций в основных подходах к оценке МХ ПИП ИК позволит значительно повысить уровень автономности, устойчивости и целостности функционирования ИС в целом на объектах ВВТ ВМФ.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе сформулированы и предложены пути достижения цели исследования - повышение уровня автономности, устойчивости и целостности функционирования ИС при проведении их поверки в реальных условиях эксплуатации и применения на объектах ВВТ ВМФ.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения. Госстандарт России. Москва.
- [2] Приказ Минпромторга России № 2905 от 28 августа 2020 г. «Об утверждении порядка проведения испытаний стандартных образцов или средств измерений в целях утверждения типа, порядка утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений, внесения изменений в сведения о них, порядка выдачи сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, формы сертификатов об утверждении типа стандартных образцов или типа средств измерений, требований к знакам утверждения типа стандартных образцов или типа средств измерений и порядка их нанесения».
- [3] Храпов, Ф.И. К вопросу использования различных видов избыточности для оценки состояния измерительных систем с труднодоступными первичными измерительными преобразователями в процессе эксплуатации. // Вестник метролога. - 2010. - № 3, стр. 11 – 13.
- [4] Храпов, Ф.И. О необходимости комплексного использования избыточности для обеспечения заданной метрологической надёжности измерительных систем с труднодоступными компонентами. // Метрология. – 2011, - № 4. стр. 3 – 12.
- [5] Храпов, Ф.И. Комплексное использование избыточности для обнаружения метрологических отказов измерительных систем // Измерительная техника. - 2012. - № 7, стр. 27 – 28.
- [6] Лавров Р.О., Ольховский А.Н., Кувыкин Ю.А. Применение методики групповой оценки при контроле метрологических характеристик виброакустических каналов измерительных комплексов и систем. - Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. - 2021. - № 4 - С. 13-23.
- [7] Способ поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя без монтажа с объекта установки / Ю.М. Иванов, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Патент РФ № 2358244 Заявл. 26.09.2007/опубл. 06.10.2009. - Бюл. № 21.
- [8] Способ поверки пьезоэлектрического гидрофона без монтажа с объекта установки / Ю.М. Иванов, В.В. Супрунюк, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Патент РФ № 2439841 Заявл. 25.08.2010/опубл. 10.01.2012. - Бюл. № 11.
- [9] Система контроля наземная автоматизированная НАСК-1-29СМТ. Описание типа. Регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений 74027-19.

**Abstract — Distinctive features of verification of measuring systems at the objects of armament and military equipment of the Navy in real conditions of their operation and application for their intended purpose with specified metrological characteristics are considered. Attention is focused on various approaches to confirming the constancy of the metrological characteristics of measuring systems during their operation, to ensuring the required level of autonomy, stability and integrity of the functioning of their measuring channels. Possible ways of increasing these levels by means of previously unused scientific and technical solutions and methodological recommendations are shown.**

**Key words — measuring systems, primary measuring transducers, verification, structural redundancy, information redundancy.**

# О классификации методик измерений и формах подтверждения их соответствия установленным требованиям

А. А. Тумилович, А. Г. Чуновкина  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: A.G.Chunovkina@vniim.ru, A.A.Koroleva@vniim.ru

**Аннотация** – В статье анализируются различные методики измерений в зависимости от их места в реализации цепи метрологической прослеживаемости результата измерения: методики измерений конечного пользователя, методики измерений, применяющиеся при передаче единицы величины (методики поверки, калибровки и референтные методики измерений, включая первичные методики измерений, выполняющие роль основы для сравнения при отсутствии первичного эталона соответствующей единицы измерения). Также в статье рассмотрены требования к метрологическим характеристикам методик измерений и процедуры оценки соответствия методик указанным требованиям. Обсуждаются области применения действующих нормативных документов по методикам измерений, калибровки и референтным методикам.

**Ключевые слова** – подтверждение соответствия, методики измерений, верификация, валидация, аттестация

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для достижения цели обеспечения единства измерений, метрологические лаборатории должны обеспечивать прослеживаемость применяемых средств измерений к государственным эталонам единиц величин. Цель достигается через реализацию цепи метрологической прослеживаемости результатов измерений, в которой участвуют эталоны разных уровней, средства измерений и, соответственно, методики передачи единицы величины (поверки, калибровки, референтные) и методики измерений (МИ). Применение методик измерений и методик передачи единицы величины позволяет получать достоверные результаты при проведении тех или иных измерений в различных областях. Кроме того, методики измерений могут быть составной частью методик испытаний, контроля, обнаружения и т.д.

В новых областях измерений существует немало случаев, когда нет возможности обеспечить прослеживаемость результатов измерений к государственному национальному эталону, поскольку такой эталон может отсутствовать. Такие случаи характерны в области физико-химических измерений и в области лабораторной медицины, где прослеживаемость обеспечивается не к государственному эталону, а к первичной референтной методике измерения.

К результатам измерений, получаемым при использовании данных методик измерений, устанавливаются метрологические требования к показателям точности. К таким показателям точности могут относиться: среднеквадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, неопределенность измерений, правильность, прецизионность и др. С целью подтверждения соответствия показателей точности методик измерений были внедрены такие процедуры, как аттестация, валидация и верификация.

Целью данной статьи является анализ и разбор имеющихся на данный момент в Российской Федерации видов методик измерений, их показателей точности, способов оценки соответствия методик измерений установленным требованиям, а также соотнесение данных объектов и процедур между собой.

## II. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ

К рассматриваемым в статье методикам измерений относятся: методики (методы) измерений (за исключением методик прямых измерений) по ГОСТ Р 8.563-2009 и ГОСТ 8.010-2013 [1, 2], первичные референтные методики и референтные методики измерений по ГОСТ Р ИСО 15193-2015 и ГОСТ 17511-2011 [3, 4].

По месту в цепи метрологической прослеживаемости методики измерений подразделяются на (Рис. 1):

- первичные референтные методики измерения;
- референтные методики измерения;
- методики измерений, которые используются при калибровке эталонов и средств измерений (методики калибровки) ГОСТ Р 8.879-2014 [5];
- методики измерений, которые используются при поверке эталонов и средств измерений (методики поверки);
- методики измерений «конечного пользователя», которые широко используются в различных областях промышленности, для контроля окружающей среды и часто являются составной частью методики контроля, методики испытаний и др.

На рисунке 1 представлена иерархия перечисленных методик измерений в цепи метрологической прослеживаемости.

Разработку методики калибровки (поверки) может осуществлять разработчик средств измерений, организация, проводящая испытания с целью утверждения типа средства измерения (СИ), или аккредитованная калибровочная лаборатория. Референтные (первичные) методики измерений разрабатываются, как правило, национальными метрологическими институтами, в том числе с целью аттестации стандартных образцов/калибраторов, служащих для реализации прослеживаемости результатов измерений, проводимых конечными пользователями (лабораториями рутинных измерений).

Каждая из перечисленных методик измерений предназначена для решения определенных задач, однако, их можно классифицировать по различным признакам: применение в сфере государственного регулирования, применение вне сферы государственного регулирования, схожие подходы к выражению точности, схожие методы оценивания показателей точности.



Рис. 1 – Классификация методик измерений

По сфере применения методики измерений условно можно разделить на две категории:

1. методики измерений, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (ОЕИ);
2. методики измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

### III. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ

Согласно требованиям к испытательным и калибровочным лабораториям, описанным в документе ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 «Лаборатория должна установить и поддерживать метрологическую прослеживаемость результатов своих измерений, связывая их с соответствующей основой для сравнения посредством документированной непрерывной цепи калибровок, каждая из которых вносит свой вклад в неопределенность измерений» [6].

Лабораториями должна обеспечиваться прослеживаемость результатов измерений к Международной системе единиц (SI). Если для единицы измерения существует

воспроизводящий ее первичный эталон, то метрологическая прослеживаемость реализуется через иерархию эталонов и средств измерений, где процедуры передачи единицы величины определяются методиками калибровки (поверки). Если соответствующий первичный эталон отсутствует, то его роль отводится (первичной) референтной методике измерений или первичному калибратору. Способы, основанные на референтных методиках измерений, аттестованных с их помощью стандартных образцов веществ и материалов, а также на результатах сличений и межлабораторных сравнительных испытаний, получили широкое распространение в биологии и медицине для измерения величин, характеризующих состав и физико-химические свойства объектов.

Стандарт ГОСТ Р 8.879-2014 устанавливает основные требования к построению, содержанию и изложению методик калибровки средств измерений в соответствии с положениями ГОСТ ИСО/МЭК 17025. В п. 4.7 ГОСТ Р 8.879-2014 также подчеркивается важность наличия в методике калибровки «требований, обеспечивающих прослеживаемость измерений, выполняемых откалиброванными средствами измерений, до государственных первичных эталонов или национальных первичных эталонов иностранных государств».

Если у лаборатории нет возможности установить метрологическую прослеживаемость к единицам SI, то лаборатории необходимо продемонстрировать метрологическую прослеживаемость либо к сертифицированному стандартному образцу, либо к результатам, полученным с применением референтных методик измерений. Таким образом, при реализации схем метрологической прослеживаемости основой для сравнения является единица SI (первичный эталон, воспроизводящий единицу SI), первичная референтная методика измерений или сертифицированный стандартный образец (первичный калибратор).

Разнообразные схемы метрологической прослеживаемости достаточно полно проработаны в области лабораторной медицины. Например, схемы, поясняющие место первичных референтных методик, референтных методик, методик калибровки и методик измерений конечного пользователя, которые часто реализованы в аналитических системах закрытого типа, представлены в ГОСТ/ИСО 17511-2011.

В нормативных документах по референтным методикам измерений: ГОСТ Р ИСО 15193-2015, ГОСТ ИСО 17511-2011 и Р 50.2.081-2011 [7], отмечается, что их разработка направлена на создание нормативной базы для более широкого распространения принципа прослеживаемости при измерениях величин, характеризующих химический состав и физико-химические свойства различных объектов.

Роль перечисленных методик измерений в схемах метрологической прослеживаемости, условно продемонстрирована на рисунке 2.

Метрологическая прослеживаемость лежит в основе обеспечения сопоставимости результатов измерений, но не гарантирует требуемой точности измерений.



Рис. 2 – Роль методик измерений в схеме метрологической прослеживаемости

#### IV. ПОКАЗАТЕЛИ ТОЧНОСТИ

Методики измерений разрабатывают и применяют с целью обеспечения выполнения измерений с требуемой точностью. В документе ГОСТ 8.010-2013 «Методики выполнения измерений. Основные положения» говорится, что «показатели точности измерений должны соответствовать исходным данным на разработку методики выполнения измерений».

Показателями точности методик измерений являются:

- показатели точности по ГОСТ ИСО 5725-1 [8]: правильность, прецизионность [ГОСТ 8.010-2013, ГОСТ Р 8.563-2009];
- характеристики погрешности по МИ 1317-2004 [ГОСТ 8.010-2013, ГОСТ Р 8.563-2009];
- неопределенность измерений [ГОСТ 8.010-2013, ГОСТ Р 8.563-2009];
- доверительные границы погрешности [РМГ 29-2013 [10]];
- др. метрологические характеристики.

В зависимости от форм выражения показателей точности и подходов к их определению методики измерений могут быть условно классифицированы по следующим показателям:

- показатели правильности и прецизионности: методики измерений конечного пользователя, которые часто являются составной частью методик испытаний, контроля и т.д. Определение показателей точности часто выполняется в ходе межлабораторного эксперимента и с

применением сертифицированных стандартных образцов;

- характеристики погрешности измерений, включая доверительные границы погрешности: методики измерений конечного пользователя, часто реализованные измерительными системами. Определение показателей точности обычно выполняется на основе расчетов и исследований в одной лаборатории;
- показатели неопределенности: референтные методики измерений, методики калибровок. Обычно применяется расчетный подход к определению показателей точности. Для референтных методик часто дополнительно проводится межлабораторный эксперимент.

Важно отметить, что к исходным данным, при разработке методик измерений обеих категорий, относятся требования к показателям точности измерений, диапазонам измерений и к условиям выполнения измерений.

К таким методикам относятся: первичные референтные методики, референтные методики и методики для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений (методики измерений конечного пользователя).

#### V. АТТЕСТАЦИЯ, ВАЛИДАЦИЯ И ВЕРИФИКАЦИЯ

Процедурами подтверждения соответствия установленным требованиям к методикам измерений являются: аттестация, валидация и верификация методик измерений.

Под аттестацией методик измерений подразумевается исследование и подтверждение соответствия методик выполнения измерений установленным метрологическим требованиям к измерениям [2]. Процедура аттеста-

ции методик измерений, первичных референтных методик измерений и референтных методик измерений подробно описана в Приказе Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 15 декабря 2015 г. N 4091 [11] и в документе ГОСТ Р 8.563—2009. Данная процедура является обязательной для методик измерений, относящихся к сфере государственного регулирования и добровольной, если методика измерений не относится к сфере государственного регулирования.

В стандарте ГОСТ Р 8.563-2009 п. 4.3 сформулировано важное требование к методикам измерений, применяемым в сфере государственного регулирования ОЕИ: «Документы, предназначенные для применения в сфере государственного регулирования ОЕИ и содержащие методики измерений, должны включать в себя сведения об аттестации методик измерений, а также сведения о наличии их в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений».

Понятия валидации и верификации методик измерения появились в отечественной системе в процессе перевода иностранных документов по метрологии. Это привело к некоторой путанице, так как в отечественной метрологии традиционно используется термин аттестация. Так, в переводе международного словаря по метрологии (VIM-3) отсутствует термин «аттестация» сам по себе, но присутствует термин «валидация», сопровождаемый пояснением к нему «аттестация», а термин «верификация» даётся вместе с пояснением «поверка (средств измерений)». ГОСТ ИСО 17025-2019 описывает в каком случае какую оценку соответствия метода измерений лаборатория должна провести при аккредитации на соответствие требованиям данному стандарту:

• п. 7.2.1.5 «До внедрения методов в работу лаборатория должна подтвердить, что она может надлежащим образом применять выбранные методы, обеспечивая требуемое исполнение. Записи о верификации должны сохраняться»;

• п. 7.2.2.1 «Лаборатория должна проводить валидацию нестандартных методов, методов, разработанных лабораторией, и стандартных методов, используемых за пределами их области применения или каким-либо иным образом модифицированных».

Более подробно в областях применения процедур валидации и верификации помогает разобраться руководство ЕВРАХИМ «Валидация аналитических методик» [12]. Здесь даётся более раскрытое пояснение применения валидации и верификации в качестве оценок соответствия:

• п. 2.1 «Валидация методики, в основном, представляет собой процесс определения аналитических требований и подтверждения соответствия рассматриваемой методики её целевому назначению.»;

• п.2.2 «Лаборатория может внедрить методику, прошедшую валидацию, которая, например, опубликована в качестве стандарта, или же приобрести полную измерительную систему, предназначенную для конкретного применения, у коммерческого производителя. В обоих случаях основная работа по валидации уже выполнена, однако лаборатория должна подтвердить свою способность использовать данную методику. Это и есть верификация».

В стандарте ГОСТ Р 8.563-2009, распространяющимся на методики (методы) измерений, включая методики количественного химического анализа, установлены общие положения и требования, относящиеся к разработке, аттестации, стандартизации, применению методик измерений и метрологическому надзору за ними.

Соотношение форм подтверждения соответствия методик измерений выглядит как показано на рис.3:



Рис.3 – Формы оценки и подтверждения соответствия метрологическим требованиям методик измерений

В процессе верификации и валидации методик калибровки/измерений должна проводиться:

- проверка соответствия метрологических характеристик обязательным метрологическим требованиям к измерениям;
- оценка правильности и обоснованности выбора метода измерений, средств измерений, эталонов, стандартных образцов, программного обеспечения, вспомогательных и других технических средств, реактивов и материалов;
- оценка корректности принятых математических моделей и алгоритмов обработки данных, способов представления результатов измерений;
- оценка метрологической прослеживаемости измерений, выполняемых по МИ, а также метрологической прослеживаемости измерений, выполненных при разработке МИ;
- оценивание неопределенности измерений.

При установлении обязательных метрологических требований к измерениям, относящимся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут использоваться результаты измерений, полученные с применением референтных методик измерений [13].

Референтные методики аналитических измерений могут быть использованы для оценки характеристик измерительных систем, включающих в себя измерительные приборы, дополнительное оборудование и реагенты; демонстрации функциональной взаимозаменяемости различных рутинных методик измерений, предназначенных для измерения одной и той же величины; приписывания значений стандартным образцам, которые используются для целей калибровки или контроля рутинных методик измерения [14].

К методикам измерений, применяемых вне сферы государственного регулирования обеспечения единства измерений, относятся: методики калибровки и методики конечного пользователя (тех областей, которые не включены в сферу государственного регулирования). Для данных методик измерения, в соответствии с ГОСТ Р 8.563-2009, аттестация может быть проведена в добровольном порядке. Но стоит отметить, что, если лаборатория желает быть аккредитованной на соответствие ГОСТ ИСО/МЭК 17025, то методы, применяемые в методиках измерений данной лаборатории, должны быть валидированы или верифицированы этой лабораторией.

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа имеющихся на данный момент в Российской Федерации видов методик измерений, их показателей точности, способов оценки соответствия методик измерений установленным требованиям, появилась возможность представить всю информацию в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Требования, предъявляемые к методикам измерений

	<b>Методики, находящиеся в сфере гос. регулирования: ПРМИ, РМИ, др. методики измерений*</b>	<b>Методики, находящиеся вне сферы гос. регулирования: МИ, методики калибровки.</b>
<b>Документы, устанавливающие требования к методикам</b>	Приказ от 15 декабря 2015г. №4091, ГОСТ Р 8.563-2009, ГОСТ 8.010-2013, ГОСТ Р ИСО 5725-(1-6)-2002	ГОСТ 8.879-2014, ГОСТ Р 8.563-2009, ГОСТ 8.010-2013, ГОСТ Р ИСО 5725-(1-6)-2002
<b>Вид документа, устанавливающий методику измерений</b>	-отдельный документ (нормативный документ в области стандартизации, инструкция и т.п.) - в разделе или части документа (раздел документа в области стандартизации, технических условий, конструкторского или технического документа и т.п.)	-отдельный документ (нормативный документ в области стандартизации, инструкция и т.п.) - в разделе или части документа (раздел документа в области стандартизации, технических условий, конструкторского или технического документа и т.п.) -международный, региональный, межгосударственный или национальный стандарт; - специальный раздел технических условий на средства измерений или соответствующего стандарта; -специальный раздел эксплуатационной документации средств измерений; -документ, оформленный в качестве рекомендаций, утвержденных государственным научным метрологическим институтом; -документ, утверждаемый руководителем предприятия - разработчика методики калибровки; -документ, утверждаемый руководителем предприятия, применяющего методику калибровки
<b>Показатели точности</b>	характеристики погрешности измерений в соответствии с [Рекомендации по метрологии МИ 1317-2004], показатели неопределенности измерений в соответствии с [ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009] и [Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК «Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях» (2-е изд., 200)], а также показатели точности по ГОСТ Р ИСО 5725-1.	характеристики погрешности измерений в соответствии с [Рекомендации по метрологии МИ 1317-2004], показатели неопределенности измерений в соответствии с [ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009] и [Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК «Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях» (2-е изд., 200)], а также показатели точности по ГОСТ Р ИСО 5725-1.
<b>Оценка пригодности</b>	Обязательная	Обязательная**
<b>Форма оценки соответствия</b>	Аттестация	Валидация, верификация, аттестация
<b>Кто проводит оценку пригодности</b>	Аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели, в том числе государственные научные метрологические институты и государственные региональные центры метрологии	Аккредитованные в установленном порядке в области обеспечения единства измерений юридические лица и индивидуальные предприниматели, в том числе государственные научные метрологические институты и государственные региональные центры метрологии

Проанализированы различные виды методик измерений на предмет их роли в реализации цепи метрологической прослеживаемости с целью обеспечения единства измерений.

Рассмотрены все имеющиеся на данный момент в национальных НД формы оценки и подтверждения соответствия требованиям методик калибровки средств измерений, методик выполнения измерений и референтных методик измерений.

Предложена классификация методик измерений в соответствии со следующими признаками:

- место в реализации цепи метрологической прослеживаемости;
- способ выражения показателей точности и методы их определения;
- форма оценивания соответствия требованиям и сфера применения методики измерений.

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 1

Документ, подтверждающий пригодность методики	Свидетельство об аттестации	Свидетельство об аттестации, протокол валидации, протокол верификации.
*За исключением методик измерений, предназначенных для выполнения прямых измерений ** За исключением процедуры аттестации		

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений.
- [2] ГОСТ 8.010-2013. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения.
- [3] ГОСТ Р ИСО 15193-2015. Изделия медицинские для диагностики in vitro. Измерение величин в пробах биологического происхождения. Требования к описанию референтных методик выполнения измерений.
- [4] ГОСТ ISO 17511-2011. Изделия медицинские для диагностики in vitro. Измерение величин в биологических пробах. Метрологическая прослеживаемость значений, приписанных калибратором и контрольным материалам.
- [5] ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению.
- [6] ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.
- [7] Р 50.2.081-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Лаборатории референтные. Основные положения.
- [8] ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
- [9] МИ 1317-2004. Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.
- [10] РМГ 29-2013. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
- [11] Приказ Министерства промышленности и торговли РФ от 15 декабря 2015 г. N 4091 "Об утверждении Порядка аттестации первичных референтных методик (методов) измерений, референтных методик (методов) измерений и методик (методов) измерений и их применения".
- [12] Валидация аналитических методик: пер. с англ.яз. 2-го изд. под ред. Г.Р. Нежиховского. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях: пер. англ.яз. 3-го изд. под ред. Р.Л. Кадиса. Руководства для лабораторий.– СПб.: ЦОП «Профессия», 2016.– 312 с.
- [13] Федеральный закон от 21.07.2014 № 254-ФЗ "О внесении изменений в Федеральный закон "Об обеспечении единства измерений".
- [14] Бакеева Р.Ф., Рязанова В.А., Фишман И.И., Сопин В.Ф. Требования к референтным методикам аналитических измерений в технологических процессах// Вестник технологического университета.– 2015.–Т 18.–№14 – С.104-109.

**of active normative documents on measurement procedures, calibration procedures, and reference procedures are discussed.**

**Key words — conformance assessment, measurement procedure, verification, validation, attestation.**

**Abstract — Different procedures are analysed in the presentation depending on their place in a measurement result traceability chain: final user's procedures, procedures used for a quantity unit transfer (verification and calibration procedures, and reference procedures including primary procedures serving to be a base for comparison in absence of the primary standard of related unit). Also, requirements to measurement procedures metrological characteristics, and evaluation procedures of procedure conformance with the requirements mentioned are considered in the presentation. Fields of application**

# Расширение моделей данных с целью обеспечения эффективности результатов измерений

Т. Н. Сирая

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30  
E-mail: metrolog@eprib.ru

**Аннотация** — Рассматривается расширение моделей данных с целью получения эффективных результатов измерений и достоверных оценок их погрешностей. Приведены основные принципы расширения моделей данных, включая выбор направлений расширения. Решение этих задач показано на практически важных примерах – прямых измерениях с многократными наблюдениями и построении функциональных зависимостей.

**Ключевые слова** — модель данных, погрешность, эффективность.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Усложнение современных измерительных задач в навигационном приборостроении, а также повышение требований к точности измерений приводят к необходимости оценивать и сопоставлять показатели точности измерений.

Особенностью измерений при создании и испытаниях навигационной аппаратуры является необходимость обеспечивать высокие точности, близкие к эталонному уровню, при сложных условиях измерений. При аттестации испытательного оборудования, предназначенного для испытаний навигационной аппаратуры, также возникают сложные измерительные задачи с высокими требованиями к точности. Все это требует корректного оценивания показателей точности измерений.

Эффективное решение указанных задач возможно лишь при использовании адекватных моделей данных. Не вполне адекватная модель данных приводит к получению недостаточно точных результатов измерений, но самое главное – получаются ошибочные оценки погрешностей измерений [ 1, 2 ]. В этом случае на основе результатов измерений могут получаться неверные выводы при контроле.

Реальные данные не всегда соответствуют классическим моделям (как правило – статистическим), или их соответствие моделям трудно проверить. На практике нередко отмечают, что при использовании оптимальных алгоритмов точность полученных результатов не вполне соответствует теоретическим оценкам. Поэтому часто важной оказывается не оптимальность алгоритма обработки (при заданной строгой модели данных), а высокая эффективность для широкого набора моделей данных. Следовательно, для обработки данных и оценивания погрешностей измерений целесообразно переходить к расширенным моделям данных и использовать соответствующие методы обработки [1, 3, 4].

В докладе рассматриваются вопросы расширения моделей данных, в том числе, общие принципы и основные направления расширения моделей. На их основе рассматриваются методы обработки данных, включая оценивание погрешностей. Практическая реализация такого подхода показана на примере наиболее важных задач обработки данных, включая прямые измерения с многократными наблюдениями и построение функциональных зависимостей в измерительных задачах. Кроме того, расширенные модели позволяют уточнить смысл и интерпретацию неклассических характеристик точности измерений, что показано на примере вариации Аллана.

## II. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАСШИРЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ. ОБЩАЯ СХЕМА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

Обработка экспериментальных данных при измерении составляет существенную часть измерительной процедуры, поскольку лишь при ее эффективном выполнении будет получена точная оценка измеряемой величины и корректная оценка погрешности.

Общую последовательность операций при обработке данных при измерении можно представить следующим образом [1]:

- а) сформировать исходную модель данных на основе постановки измерительной задачи, предыдущего опыта ее решения и полученной априорной информации;
- б) проанализировать полученные экспериментальные данные (результаты наблюдений) на соответствие принятой модели, учитывая сведения о погрешностях средств измерений, и при необходимости – уточнить модель;
- в) выбрать алгоритм (из ранее известных), разработать или уточнить алгоритм обработки данных;
- г) выполнить вычисления согласно принятому алгоритму, в том числе, вычислить результат измерения и оценить показатели его погрешности;
- д) провести итоговый анализ результатов измерений, включая проверку их соответствия принятой модели и исходным требованиям.

Таким образом, модели данных играют существенную роль в процедуре обработки данных. Обычно на практике приведенную схему реализуют не в полном объеме, предполагая, что подготовительные операции (связанные с анализом моделей и выбором алгоритма)



выполнены ранее - при разработке методики измерений или контроля. Однако, как показывает практика, небольшие и обычно незаметные отклонения данных от исходных моделей, которые встречаются достаточно часто, приводят не только к снижению точности результатов, но самое главное - к значительным искажениям в оценках их погрешностей.

Разумеется, в настоящее время разработаны различные методы проверки адекватности моделей данных [1, 2], но они достаточно трудоемки и также используют расширенные модели, учитывающие определенные виды отклонений от исходных моделей.

В современном прикладном анализе данных (data analysis) развивается ряд направлений, которые основаны не на принципах оптимальности оценок (для строгой фиксированной модели данных), а на требовании обеспечить их высокую эффективность на широком наборе моделей данных [3, 4].

В частности, этот подход связан с развитием направлений:

- устойчивые (робастные) методы оценивания;
- устойчивые методы построения моделей;
- конfluентные и устойчивые методы построения зависимостей;
- устойчивые методы проверки гипотез.

По существу, такой подход означает переход от идеализированной (классической) модели данных к реалистической (расширенной) модели.

### III. РАСШИРЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДАННЫХ ДЛЯ ОСНОВНЫХ КАТЕГОРИЙ ИЗМЕРЕНИЙ

#### *Прямые измерения с многократными наблюдениями*

Задача обработки данных при прямых измерениях с многократными наблюдениями сводится к оцениванию параметра  $Q$  по выборке

$$\{x_i = Q + w_i, i=1...n\}. \quad (1)$$

При этом, следуя классической статистике, относительно погрешностей  $w_i$  в явном или неявном виде вводятся достаточно строгие предположения:

- а)  $w_i$  – случайные величины,
- б)  $w_i$  – имеют одинаковые распределения,
- в)  $w_i$  – независимы,
- г)  $w_i$  – имеют гауссовские распределения,
- д)  $w_i$  – имеют нулевые средние.

При перечисленных условиях (то есть, в рамках классической модели выборки) оптимальной оценкой параметра  $Q$  является среднее арифметическое выборки  $\bar{x}$ , и именно ее чаще всего используют на практике. Однако эта оценка  $\bar{x}$  быстро теряет оптимальность при отклонениях данных от Гауссовского распределения.

Разумеется, любое из введенных предположений может быть нарушено, и тогда необходимо расширять мо-

дель. Направления расширения классической модели выборки могут быть разнообразны, в частности:

- Распределение  $w_i$  близко к Гауссовскому,
- Выборка Гауссовская, но может содержать выбросы;
- Распределение – одно из нескольких заданных, например: Гауссовское, равномерное или экспоненциальное (Лапласа);
- Распределение принадлежит к заданному параметрическому семейству распределений (например, экспоненциальному);
- Распределение может быть любым непрерывным, имеющим конечную дисперсию;
- Погрешности  $w_i$  содержат систематические составляющие;
- Выборка (1) разбивается на несколько однородных групп.

Достаточно распространенными на практике оказываются случаи, когда распределение данных лишь приближенно описывается Гауссовским законом или в выборке имеются выбросы. Тогда целесообразно перейти к расширенной модели – например, использовать засоренное Гауссовское распределение, которое имеет плотность вида:

$$P_\varepsilon(x) = (1 - \varepsilon)\varphi(x) + \varepsilon h(x), \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – уровень засорения;

$\varphi(x)$  – плотность Гауссовского (основного) распределения;

$h(x)$  – плотность произвольного (засоряющего) распределения.

Тогда за результат измерения целесообразно принять усеченное среднее  $\bar{x}(\alpha)$ , где  $\alpha \in (0, 1)$  – доля усечения. Оценка  $\bar{x}(\alpha)$  получается, если в упорядоченной выборке  $x'_1 \leq \dots \leq x'_n$  отбросить первые  $k=[n\alpha]$  и последние  $k$  элементов, и усреднить остальные данные. Долю усечения  $\alpha$  выбирают в зависимости от уровня засорения:  $\alpha \geq \varepsilon$ . При небольшом уровне засорения рекомендуется принимать  $\alpha = 0,05$ ; при среднем  $\alpha = 0,10$ ; при значительном  $\alpha = 0,25$ .

Усеченные средние - это простейший пример устойчивой оценки, которая слабо зависит от нарушения условия гауссовского распределения; кроме них, имеется также много других оценок [1, 3].

Если распределение данных не удастся определить приближенно, то целесообразно использовать непараметрические оценки, которые не зависят от вида распределения и основаны на упорядоченной выборке  $x'_1 \leq \dots \leq x'_n$ . Наиболее распространенной и весьма устойчивой оценкой является выборочная медиана  $med(x)$ , которая определяется как центральный элемент в упорядоченной выборке.

На этом простом, но практически важном примере можно наглядно проследить особенности процедуры

расширения моделей данных. При этом параметр  $\varepsilon$  характеризует степень отклонения модели от исходной (Гауссовской), а параметр  $\alpha$  - отражает степень устойчивости оценки (ее зависимость от возможных отклонений).

В качестве примера приведем краткую таблицу относительных показателей погрешностей для ряда усеченных оценок  $\bar{x}(\alpha)$  в сопоставлении с классической оценкой  $\bar{x}$ .

ТАБЛИЦА 1

Распределение погрешностей	Относительные показатели погрешностей оценок			
	$\bar{x}$	$\bar{x}(0,05)$	$\bar{x}(0,25)$	med
$N(0, \sigma^2)$	<u>1,00</u>	1,03	1,20	1,57
$R(0, \sigma^2)$	1,00	1,20	2,00	3,00
$L(0, \sigma^2)$	1,00	0,83	0,61	<u>0,50</u>
$N_c(0, \sigma^2)$	1,00	<u>0,82</u>	0,92	1,20

В табл. 1 относительные показатели погрешностей оценок  $D(u) / \sigma^2$  приведены при следующих распределениях данных:

- гауссовское (N),
- равномерное (R),
- экспоненциальное (L),
- засоренное гауссовское ( $N_c$ ).

Приведенные устойчивые оценки  $\bar{x}(\alpha)$  достаточно эффективны даже при Гауссовской модели, а при отклонениях от нее - быстро обгоняют по эффективности классическую оценку  $\bar{x}$ .

Для каждого распределения выделены наиболее точные оценки (из данного набора). Отметим, случай равномерного распределения существенно выделяется; при этом наилучшая оценка - полусумма крайних элементов выборки:

$$U_R = (x_1' + x_n') / 2$$

Однако эта оценка не является эффективной и устойчивой при распределениях, близких к Гауссовскому, и потому не включена в табл. 1.

### Построение функциональных зависимостей

Задачи построения функциональных зависимостей (ФЗ) по экспериментальным данным часто встречаются в измерительной практике, например, при определении калибровочных характеристик устройств, при разработке методик измерений и контроля. Качество эмпирической ФЗ существенно влияет на точность измерений или достоверность контроля, что обуславливает значимость выбора алгоритмов построения и оценивания погрешностей ФЗ.

При построении ФЗ известного параметрического вида

$$Y = f(X) = f(X, a_1, \dots, a_k), \quad (3)$$

где  $X$  и  $Y$  - входные и выходные величины,

$a_1, \dots, a_k$  - искомые параметры,

используется набор экспериментальных данных:

$$\{x_{ij}, y_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\}.$$

Исходной является классическая регрессионная модель данных:

$$\Omega(R_0) = \{x_{ij} = X_i, y_{ij} = f(X_i) + \xi_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\}, \quad (4)$$

где  $X_i$  и  $Y_i = f(X_i)$  - истинные значения величин;

$\xi_{ij}$  - погрешности выходных величин  $y_{ij}$ .

В регрессионной модели вводятся следующие ограничения:

- а) входные величины  $X_i$  точно известны:  $x_{ij} = X_i$ ;
- б) погрешности выходных величин  $y_{ij}$  - случайны и имеют одинаковые распределения;
- в) погрешности  $y_{ij}$  - имеют Гауссовы распределения.

Для оценивания ФЗ используются регрессионные методы, прежде всего - классический метод наименьших квадратов (МНК) [1, 4]. МНК-оценки являются оптимальными в случае строгой регрессионной модели, то есть, при точно заданных входных величинах  $X_i$ . При нарушении этого условия МНК-оценки несостоятельны; поэтому для получения состоятельных оценок необходимо использовать расширенные конъюгентные модели и алгоритмы [1, 4].

В общем случае входные величины  $x_{ij}$  также содержат погрешности  $\eta_{ij}$ , то есть, имеет место общая конъюгентная модель:

$$\Omega(C_0) = \{x_{ij} = X_i + \eta_{ij}, y_{ij} = f(X_i) + \xi_{ij}, i=1 \dots n, j=1 \dots m_i\}. \quad (5)$$

В рамках общей модели  $\Omega(C_0)$  классические МНК-оценки несостоятельны, то есть, приводят к асимптотическим смещениям параметров. Необходимо построить конструктивные расширения регрессионной модели  $\Omega(C_p)$ , в рамках которых можно получать состоятельные оценки параметров ФЗ. Они основаны на дополнительной информации о данных, которая часто бывает доступна на практике.

Далее приводятся некоторые варианты дополнительной информации о данных, которая позволяет получить конструктивную конъюгентную модель и построить состоятельные оценки [1]:

- а) Для входной и выходной величин выполняются многократные наблюдения, которые позволяют оценить дисперсии погрешностей измерений,  $D(\xi)$  и  $D(\eta)$ ;
- б) Известна оценка дисперсии погрешностей одной из переменных,  $D(\xi)$  или  $D(\eta)$  (заданная априори или оцененная в независимой серии экспериментов);
- в) Известно отношение дисперсий погрешностей переменных:  $\lambda = D(\xi) / D(\eta)$  (заданное априори или оцененное в независимой серии экспериментов);
- г) Известен (задан априори или следует из физических условий опыта) порядок возрастания значений аргумента  $X_i$ .

Кроме того, для некоторых классов ФЗ (например, для линейных ФЗ) можно получить конфлюентные модели на основе планируемого эксперимента [1, 4].

На основе приведенных вариантов дополнительной информации можно получать модификации МНК-оценок, которые являются состоятельными конфлюентными оценками.

Отметим, что в конфлюентной модели обычно нет несмещенных оценок параметров; поэтому при сопоставлении оценок следует учитывать не только их дисперсии  $D(u) = M [ u - Mu ]^2$ , но и смещения:

$$B(u) = Mu - u_0,$$

где  $u_0$  – истинное значение оцениваемого параметра.

Можно также использовать комбинированную оценку – второй момент относительно истинного значения параметра (или среднюю квадратическую погрешность):

$$M_2(u) = D(u) + B^2(u)$$

В качестве примера приведем краткую таблицу, в которой приведены выражения модифицированных МНК-оценок коэффициента преобразования линейной ФЗ и их характеристик – смещения  $B(b)$  и второго момента  $M_2(b)$ , в сопоставлении с классической оценкой МНК.

В табл. 2 использованы следующие обозначения для сумм квадратов данных:

$$\sum_x = \sum_1^m (x_i - \bar{x})^2 \quad \sum_y = \sum_1^m (y_i - \bar{y})^2 ;$$

$$\sum_{xy} = \sum_1^m (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Относительно расположения точек  $X_i$  по диапазону предполагается, что выполнено условие

$$\tau_m = \frac{1}{m} \sum_1^m (x_i - \bar{x})^2 \rightarrow \tau > 0$$

Это условие означает, что не происходит концентрации  $X_i$  вблизи одной точки.

Из табл. 2 видно, что смещения модифицированных МНК-оценок стремятся к 0, то есть, оценки состоятельны. В отличие от них, МНК-оценка имеет значимое асимптотическое смещение.

Выше описано одно из направлений расширения регрессионной модели – на основе модификации МНК, при сохранении предположения о Гауссовском распределении погрешностей. Далее возможны и другие расширения – на основе робастного или непараметрического подхода, которые также приводят к корректным расширениям моделей (3). Такие расширения исходной модели позволяют получать эффективные эмпирические ФЗ и оценивать их погрешности.

Таблица 2. Модифицированные МНК-оценки коэффициента в линейной функции

Априорная информация		Оценка	Смещение $B(b)$	Второй момент $M_2$
Известные параметры	$\lambda = \sigma_y^2 / \sigma_x^2$ или оценка	$b_1 = v \pm \sqrt{v^2 + \lambda}$ , $v = (\sum_y - \lambda \sum_x) / 2 \sum_{xy}$	$\frac{2\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{b \sum_x}$	$\frac{\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{\sum_x}$
	$\sigma_x^2$ или оценка	$b_2 = \sum_{xy} / (\sum_x - (m-1)\sigma_x^2)$	$2b\sigma_x^2 / \sum_x$	
	$\sigma_y^2$ или оценка	$b_3 = (\sum_y - (m-1)\sigma_y^2) / \sum_{xy}$	$(1 - \frac{\lambda}{b^2}) b \sigma_x^2 / \sum_x$	
Многократные наблюдения	Оценка $\lambda$ , $n_i = k r_i$	$b_1 = v \pm \sqrt{v^2 + \lambda / k}$ , $v = (\sum_y - \lambda \sum_x / k) / 2 \sum_{xy}$	$B(b_1)$	$\frac{\sigma_y^2 + b \sigma_x^2}{\sum_x}$
	$S_x^2$	$b_2 = \sum_{xy} / (\sum_x - (m-1)S_x^2)$	$B(b_2)$	
	$S_y^2$	$b_3 = (\sum_y - (m-1)S_y^2) / \sum_{xy}$	$B(b_3)$	
	$S_x^2$ и $S_y^2, n_i = k r_i$	$b_4 = \frac{\pm (\sum_y - (m-1)S_y^2)}{k \left[ \sum_x - (m-1)S_x^2 \right]}$	$(1 - \frac{\lambda}{b^2}) \frac{b \sigma_x^2}{2k \sum_x}$	
МНК	—	$b_0 = \sum_{xy} / \sum_x$	$-\frac{b \sigma_x^2 (m-3)}{\sum_x}$	$\frac{\sigma_y^2 + b^2 \sigma_x^2}{\sum_x}$

IV. РАСШИРЕНИЕ МОДЕЛИ  
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ОЦЕНОК ТОЧНОСТИ

Методология расширения моделей полезна также при обосновании показателей и оценок точности измерений. В качестве примера можно привести такой актуальный показатель как вариацию Аллана (ВА), которая все более широко используется на практике [ 6 ].

ВА определяется как среднее квадратическое значение разностей последовательных значений сигнала, усреднённых на заданных интервалах:

$$\sigma_a^2(\tau) = \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1}(\tau) - x_k(\tau))^2 / 2(n-1),$$

где  $x_k(\tau)$  – среднее значение сигнала  $x(t)$  на интервале  $[t_0+k\tau, t_0+(k+1)\tau]$ ,  $k=1, \dots, n$ .

ВА была введена и успешно используется как характеристика точности (нестабильности) для стационарных, а в особенности – для ряда нестационарных моделей данных (прежде всего - Винеровских процессов и 1/f-шумов). Однако отсутствие базовой модели и формального определения ВА затрудняет интерпретацию получаемых результатов.

Для обоснования ВА, в соответствии с общими правилами [2, 5], следует расширить стационарную модель. При этом целесообразно перейти к процессам со стационарными приращениями [7]. Тогда ВА оказывается оценкой основной характеристики такого процесса – структурной функции [8]:

$$S(\tau) = M[X(t+\tau) - X(t)]^2.$$

Определение ВА на основе такой модели позволяет объяснить свойства ВА. Кроме того, становятся понятны её взаимосвязи с дисперсией. Сопоставление дисперсии и вариации Аллана представлено в табл. 3.

Таблица 3. Сопоставление дисперсии и вариации Аллана

Этапы определения характеристик	Конкретизация характеристик на этапах	
	Дисперсия	Вариация Аллана
Модель погрешности	Случайная величина $x$	Случайный процесс со стационарными приращениями $x(t)$
Параметр масштаба модели (теоретическая характеристика)	Дисперсия $D$	Структурная функция $D_0(t)$
Оценка параметра масштаба (эмпирическая характеристика)	Выборочная дисперсия $S^2$	Вариация Аллана $\sigma_a^2(\tau)$

V. ВЫВОДЫ

1 Для получения эффективных оценок параметров и достоверного оценивания показателей точности целесообразно использовать расширенные модели данных, которые позволяют учитывать возможные отклонения реальных данных от исходных (классических) моделей.

2 Приведенные основные принципы расширения моделей отражают особенности получения моделей данных, полезных для практики. В рамках расширенных моделей можно контролировать отклонения данных от исходных моделей, оценивать погрешности получаемых оценок и сопоставлять их с погрешностями классических оценок.

3 Конкретные расширения моделей данных показаны на ряде измерительных задач, включая прямые измерения с многократными наблюдениями и построение эмпирических функциональных зависимостей.

4 Использование расширенных моделей данных полезно также для введения или обоснования новых характеристик точности измерений (показано на примере вариации Аллана).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лячев В. В., Довбета Л. И., Сирая Т. Н. Метрологические основы теории измерительных процедур / Под ред. В. В. Лячева. СПб.: Элмор, 2011. 416 с.
- [2] Грановский В. А., Сирая Т. Н. Проблема адекватности моделей в измерениях. – Датчики и системы, 2007, № 10. С. 52-62.
- [3] Шуленин В. Н. Робастные методы математической статистики. – Томск: Изд-во НТЛ, 2016. 260 с.
- [4] Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Прикладная статистика и основы эконометрики – М.: ЮНИТИ, 1998. 1022 с.
- [5] Сирая Т. Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели. – Измерительная техника, 2018, № 1. С. 3 – 12.
- [6] Аллан Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения. – Гироскопия и навигация, № 4 (91), 2015. С. 3 – 20.
- [7] Yaglom A. M. Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions. – Vol. 1, Vol. 2. – Springer-Verlag, New York, 1987.
- [8] Сирая Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных систем - Гироскопия и навигация, 2020, т. 28, № 1. С. 3-18.

**Abstract** — Topical issues related to extension of data models are considered. The basic principles of data model extension are outlined. Some specific cases of model extension are considered, including direct measurements with multiple observations and construction of empirical functions.

**Key words** — data model, error, efficiency.

# Технические особенности средств метрологического обеспечения комплексированных навигационных систем

Н. А. Паневкин, В. П. Серафимов  
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России  
г. Мытищи, Россия  
e-mail: etalon24@mail.ru

**Аннотация** — Проанализированы основные технические особенности средств метрологического обеспечения комплексированных навигационных систем, принадлежащих ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России. Рассмотрены испытательные стенды, мобильная лаборатория, аппаратно-программный комплекс, моделирующий работу инерциальных навигационных модулей. Данные средства позволяют проводить испытания комплексированных и инерциальных навигационных систем в различных режимах работы, а также могут быть использованы при разработке инерциальных модулей комплексированных навигационных систем..

**Ключевые слова** — комплексированные навигационные системы, инерциальные навигационные системы, стенды испытательные, подвижная лаборатория, аппаратно-программный комплекс

## I. ВВЕДЕНИЕ

Комплексированные навигационные системы (КНС) являются средствами обеспечения высокой точности оценки местоположения потребителя (например, морских судов, систем наведения) и ориентации объектов в сложных динамических условиях. На сегодняшний день наиболее перспективным направлением развития КНС являются инерциально-спутниковые навигационные системы. Они совмещают достоинства двух систем – высокую точность определения кратковременного местоположения и углов наклона, свойственную инерциальным навигационным системам (ИНС), и достоверность определения местоположения и точного времени по радиосигналам, присущая ГНСС. Совместная работа данных систем позволяет компенсировать их основные недостатки – помехи при приеме радиосигналов для приемников ГНСС, а для ИНС накопление суммарной ошибки определения координат). Испытания КНС на сегодняшний день проводятся разными видами средств испытаний: для испытаний ИНС применяются испытательные стенды, а для приемников ГНСС – имитаторы сигналов (ИС) ГНСС [1-3].

Для подтверждения точностных характеристик КНС необходимы специальные средства испытаний. ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России оснащен полным парком специализированных комплексов – средств метрологического обеспечения (МЛО) КНС, что позволяет проводить испытания на всех этапах их разработки и при введении в эксплуатацию, при эксплуатации, а также при проведении исследовательских работ. Применение данных средств МЛО позволит сократить время испытаний, обеспечить

проверку взаимодействия ИНС и системы, работающей по сигналам ГНСС.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Средства МЛО подразделяются на:

- автоматизированное рабочее место комплекса подтверждения характеристик (АРМ КПХ), в состав которого входят 3 испытательных стенда, предназначенное для проведения испытаний ИНС и КНС на предельных режимах работы;
- мобильная лаборатория испытаний сложных комплексированных систем (МЛИС) для проверки точностных характеристик на контрольных маршрутах движения (КМД);
- аппаратно-программный комплекс оценки характеристик комплексированной навигационной аппаратуры (АПК-КНАП), предназначенный для оценки характеристик комплексированных навигационных модулей.

Технические особенности данных средств МЛО рассмотрены ниже.

## III. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ РАБОЧЕЕ МЕСТО КОМПЛЕКСА ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Принцип действия АРМ КПХ, основан на синхронизации функционирования испытательных стендов и ИС ГНСС для одновременной подачи сигналов ГНСС и движения стендов, на которых размещаются испытуемые образцы.

В состав комплекса входят 3 стенда:

- стенд испытаний на воздействие вертикальных и горизонтальных перемещений (СВГП);
- стенд испытаний на воздействие наклонно-поворотных перемещений и температуры (СНП-Т);
- стенд испытаний на воздействие центростремительных ускорений и температуры (ЦУ-Т).

Отличительной особенностью АРМ КПХ является возможность синхронизации функционирования испытательных стендов и ИС ГНСС (синхронизация механического движения стендов и сценариев имитации, подаваемых ИС). ИС ГНСС имеет возможность передачи кодовых сигналов ГНСС ГЛОНАСС санкционированного доступа L1SC.

Стенды испытаний обеспечивают:

- перемещения образца массой до 50 кг;
- подачу на антенное устройство и/или антенный вход испытываемого образца высокоточных сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS от ИС;
- возможность приема испытываемым образцом реальных сигналов НКА ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

СВП обеспечивает оценку точностных характеристик испытываемых образцов в части погрешностей измерения вертикальных и горизонтальных перемещений с заданной амплитудой и периодом, скоростей и ускорений их перемещения. Пределы допускаемого среднего квадратического отклонения (СКО) воспроизведения перемещений –  $\pm 2$  мм.

СНП-Т обеспечивает оценку точностных характеристик испытываемых образцов в части погрешностей измерения местоположения, скорости и ускорения их перемещения и измерения углов пространственной ориентации при воздействии наклонно-поворотных перемещений. Пределы допускаемого СКО воспроизведения (или измерения) перемещений по каждой оси –  $\pm 10''$ .

ЦУ-Т обеспечивает оценку точностных характеристик испытываемых образцов в части погрешностей измерения местоположения, скорости и ускорения их перемещения при воздействии центростремительных ускорений. Предел допускаемого СКО воспроизведения ускорений – 0,1 %.

СНП-Т и ЦУ-Т обеспечивают испытания образцов в заданном диапазоне температур от минус 50 °С до плюс 80 °С (пределы абсолютной погрешности установки температуры  $\pm 1,0$  °С).

АРМ КПХ предназначен для испытаний КНС на предельных режимах работы и является основным средством испытаний. ИС ГНСС и стенды испытаний совместно позволяют оценивать характеристики исследуемой КНС при изменениях температуры в реальном времени. Возможно написание специализированных сценариев имитации (например, имитация качки корабля). Помимо этого, на АРМ КПХ имеется возможность отдельно проводить испытания ИНС.

#### IV. МОБИЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ИСПЫТАНИЙ СЛОЖНЫХ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

При невозможности проведения испытаний на испытательных стендах (например, масса испытываемого образца превышает 50 кг) и/или при необходимости проведения испытаний при перемещениях в реальных условиях эксплуатации применяется МЛИС.

МЛИС обеспечивает оценку точностных характеристик испытываемых образцов в движении в части погрешностей измерения местоположения, скорости и ускорения их перемещения и измерения углов пространственной ориентации реальных условий эксплуатации.

МЛИС представляет собой автомобильное транспортное средство с установленной на нем оснасткой для обеспечения требуемого расположения интегрированной инерциальной спутниковой аппаратуры (ИИСА) и испытываемой КНС. ИИСА состоит из угломерной спутниковой аппаратуры, работающая по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS и ИНС. МЛИС также оснащен дифференциальным нави-

гационным приемником. Оценке точностных характеристик на МЛИС подвергаются испытываемые образцы массой до 150 кг.

Унифицированная оснастка для обеспечения требуемого взаимного расположения ИИСА и испытываемого образца обеспечивает пределы допускаемой СКО совмещения элементов ИИСА и испытываемой КНС  $\pm 30''$ .

МЛИС совместно с ИИСА и дифференциальным приемником по результатам постобработки обеспечивает следующие погрешности определения параметров движения:

- предел допускаемого СКО определения координат в послесеансном дифференциальном режиме – 1 м;
- предел допускаемого СКО определения составляющих вектора скорости при работе в режиме комплексирования измерений – 0,01 м/с;
- предел допускаемого СКО определения углов пространственной ориентации объекта – 3 угл. мин.;
- предел допускаемого СКО синхронизации шкалы времени аппаратуры со шкалой координированного времени UTC(SU) – 50 нс.

МЛИС обеспечивает проведение натуральных испытаний с помощью специальных КМД с наклонными участками. Выбор КМД зависит от требований к испытываемым образцам.

Помимо испытаний КНС на МЛИС могут проводиться испытания ИНС.

#### V. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

АПК-КНАП предназначен для обеспечения проверки соответствия технических характеристик модулей КНС заданным техническим требованиям на этапах разработки и эксплуатации, а также при проведении регулировочных, ремонтных и исследовательских работ в лабораторных условиях, что в полной мере позволяет заменить дорогостоящие натурные испытания.

АПК-КНАП конструктивно состоит из блока генерации данных (БГД), ИС ГНСС, блока анализа данных и экранированной камеры.

АПК-КНАП обеспечивает решение следующих основных задач:

- формирование в соответствии с заданным сценарием на радиочастотных выходах ИС АПК-КНАП навигационных сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/GALILEO;
- моделирование в соответствии с заданным сценарием параметров ИНС с помощью БГД, синхронизированного со шкалой времени ИС АПК-КНАП.

Данный комплекс моделирует выходные сигналы инерциальных датчиков одновременно с подачей сигналов ГНСС от ИС. Разработчик ИНС имеет возможность с помощью имитационного моделирования задавать требования к инерциальному модулю, проводить его настройку, проводить отладку алгоритмов совместно с модулем спутниковой навигации в различных сценариях, что уменьшает потребность в натуральных испытаниях инерциальных модулей при их разработке.

С помощью АПК КНАП возможна проверка работы модуля спутниковой навигации для КНС, которые полностью интегрированы в единый блок, при наличии подходящего тестового входного порта для приема эмулируемых потоков данных датчиков в обход физических датчиков.

АПК-КНАП выдает в составе информационного массива навигационных параметров ИНС данные баровысотомера и прибора астроориентации.

АПК-КНАП обеспечивает функционирование в двух режимах работы:

- режим формирования и выдачи информационного массива навигационных параметров ИНС

в реальном масштабе времени по данным траектории, получаемым от ИС ГНСС (этот режим является основным режимом работы);

- режим выдачи информационного массива первичных и вторичных навигационных параметров ИНС, сформированного заранее в среде разработки сценариев (режим автономной работы БГД).

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, имеющиеся в ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России средства МЛО позволяют проводить испытания КНС и ИНС в различных режимах работы, а также могут быть использованы при разработке инерциальных модулей КНС.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Перов, А.И. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. – М.: Радиотехника, 2020. – 1072 с.
- [2] Анучин, О.Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов/ О.Н. Анучин, Г.И. Емельянец. – СПб.: «Государственный Научный Центр Российской Федерации», 1999. – 357 с.
- [3] Шатилов, А.Ю. Тесносвязанный алгоритм комплексирования НАП СРНС многоцелевого ИНС/ А.Ю. Шатилов, И.А. Нагин. – М.: Радиотехника, 2012. – 420 с.

**Abstract — The main technical features of metrological support of integrated navigation systems belonging to the Federal State Budgetary Institution "GNMC" of the Ministry of Defense of Russia are analyzed. Test benches, a mobile laboratory, a hardware and software complex simulating the operation of inertial navigation modules are considered. These funds. they allow testing of integrated and inertial navigation systems in various operating modes, and can also be used in the development of inertial modules of integrated navigation systems.**

**Key words — integrated navigation systems, inertial navigation systems, test stands, mobile laboratory, hardware and software complex.**

# Опыт проведения метрологических экспертиз изделий военной техники

В. В. Беляева, Т. Н. Сирая  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metrolog@eprib.ru

**Аннотация** — Проведен анализ вопросов методического, организационного и технического обеспечения процедуры метрологической экспертизы изделий военной техники в соответствии с требованиями новых военных стандартов. Выделены особенности проведения экспертизы на разных этапах опытно-конструкторских работ, прежде всего – на этапах согласования технического задания и разработки технического проекта. Сформулированы рекомендации по конкретизации и уточнению методических вопросов, вызывающих затруднения при проведении экспертизы.

**Ключевые слова** — метрологическое обеспечение, метрологическая экспертиза, технический проект, техническое задание.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В системе обеспечения качества разработки изделий военной техники (ВТ) важную роль играет метрологическое обеспечение (МЛО) работы в целом и метрологическая экспертиза (МЭ) изделий на различных этапах их разработки как одно из важнейших направлений МЛО. Эти процедуры ранее регламентировались, прежде всего, стандартами ГОСТ РВ 1.1-96 и ГОСТ РВ 8.573-2000. К настоящему времени в организации накоплен значительный опыт проведения МЭ в соответствии с ними. В июле 2020 года были введены в действие новые Государственные военные стандарты, которые регламентируют проведение МЛО и МЭ изделий ВТ:

ГОСТ РВ 0008–000–2019 ГСИ. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения;

ГОСТ РВ 0008–003–2019 ГСИ. Метрологическая экспертиза образцов вооружения и военной техники. Организация и порядок проведения.

Новый комплекс стандартов отвечает современным требованиям МЛО изделий ВТ, а также учитывает опыт проведения МЭ изделий ВТ в соответствии с прежними стандартами.

Стоит отметить, что при практическом применении стандартов в ходе выполнении работ по МЭ высокоточной навигационной аппаратуры, в связи с особенностями данного вида изделий, разработчики изделий и метрологи организаций-разработчиков сталкиваются с определенными трудностями. В связи с этим считаем целесообразным уточнить и конкретизировать ряд методических и организационных вопросов проведения МЭ изделий ВТ.

В настоящем докладе обсуждаются основные проблемные вопросы проведения МЭ, которые выявляются на основе опыта проведения экспертиз по новым стандартам, предложены направления развития организационно-методического обеспечения МЭ изделий ВТ.

## II. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЭ ИЗДЕЛИЙ ВТ

При проведении МЭ высокоточной навигационной аппаратуры, прежде всего, выявляются следующие проблемные вопросы:

А) роли и взаимодействие организаций, участвующих в проведении МЭ (заказчиков, разработчиков и представителей Министерства обороны (МО) РФ);

Б) особенности проведения МЭ на этапе согласования тактико-технического или технического задания (ТТЗ или ТЗ);

В) особенности проведения МЭ изделий ВТ на этапе разработки технического проекта (ТП);

Г) перечни документов, представляемых на различных этапах МЭ, и требования к этим документам;

Д) уточнение метрологического статуса различных технических устройств, используемых при разработке и испытаниях изделий ВТ.

Считаем необходимым уточнить и конкретизировать приведенные вопросы с учётом особенностей разработки высокоточной навигационной аппаратуры. Ниже представлены основные, на наш взгляд, причины возникновения проблем и предложены пути их решения.

## III. РОЛИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОРГАНИЗАЦИЙ, УЧАСТВУЮЩИХ В МЭ

В нормативных документах (НД) недостаточно чётко определено взаимодействие организаций, принимающих участие в проведении МЭ: заказчиков и разработчиков изделий, а также организаций МО РФ.

При проведении МЭ на некоторых этапах опытно-конструкторской работы (ОКР) руководящая роль возлагается на заказчиков или аккредитованные организации МО РФ. При этом не определены сроки и ответственность участников МЭ, порядок отработки несоответствий, выявленных при МЭ, а также степень участия в МЭ разработчиков изделий. Это приводит к затруднениям при проведении МЭ на указанных этапах (например, при разработке ТП).



#### IV. ПРОВЕДЕНИЕ МЭ НА ЭТАПЕ СОГЛАСОВАНИЯ ТТЗ (ТЗ)

Проведение МЭ на этапе согласования ТТЗ (ТЗ) на ОКР имеет принципиальное значение для дальнейших работ по МлО разработки изделия. Такую МЭ, согласно ГОСТ РВ 0008-003 (и Приказу № 3), должны проводить организация-заказчик изделия или организация МО РФ. На практике же в различных документах порядок проведения МЭ различен, не вполне чётко определены сроки проведения МЭ и ответственность за их несоблюдение. Кроме того, не определена возможность участия разработчиков в этих МЭ.

Из-за указанной неопределённости разработчики нередко получают ТЗ, которое не прошло МЭ и содержит явные несоответствия в части задания требований по МлО. Более того, даже если ТЗ формально пройдет МЭ, то обычно разработчики получают его без приложения Заключения по результатам его МЭ, а также без отработки несоответствий в части МлО. Следовательно, деятельность разработчиков в части МлО далее значительно осложняется, поскольку такие несоответствия в ТЗ бывает весьма сложно (а чаще всего невозможно) откорректировать на последующих этапах ОКР.

#### V. ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ МЭ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ ТП

МЭ изделия на этапе разработки ТП является особенно ответственной, поскольку на данном этапе определяются основные технические решения.

Приведённые в стандартах общие требования к материалам (документам), которые подвергаются МЭ на этапе ТП, на практике часто оказываются завышенными (почти нереализуемыми), поскольку соответствующие материалы обычно разрабатываются на последующих этапах – при разработке РКД и подготовке к испытаниям. Затруднения усиливаются и в связи с тем, что в современных ОКР сроки выполнения ТП обычно оказываются весьма сжатыми, а этап эскизного проекта (ЭП), как правило, отсутствует в принципе. Поэтому на этапе ТП необходимо в короткие сроки выполнить также задачи МлО и МЭ, которые, в соответствии с ГОСТ РВ 0008-000 и ГОСТ РВ 0008-003, регламентированы на этапе ЭП.

Например, при создании новых типов высокоточной навигационной аппаратуры на этапе ТП выбирают основные методы контроля параметров изделий, в тоже время конкретные методики контроля и методики измерений часто детализируют на последующих этапах ОКР – при разработке РКД и подготовке к проведению предварительных испытаний (обычно на этапе ТП методики невозможно разработать в полном объеме). Поэтому на этапе ТП могут быть представлены лишь предварительные варианты перечней контролируемых параметров и метрологических цепей.

Разумеется, для различных ОКР ситуации в части степени проработки методик контроля существенно различаются. Поэтому представляется целесообразным выделить несколько видов ОКР, в зависимости от уровня (степени)

проработки технических решений на этапе ТП (или степени необходимой доработки по сравнению с изделиями-аналогами), прежде всего:

- ОКР, требующее привязки ранее разработанного изделия;
- ОКР, требующие радикальной модернизации существующего изделия;
- ОКР по разработке принципиально новых технических решений изделия.

Для последней группы ОКР, по-видимому, необходимо предусмотреть обязательный этап ЭП.

Для указанных групп ОКР целесообразно выделить соответствующие требования к объему работ по МлО на этапе ТП и документам, представляемым на указанную МЭ.

#### VI. ПЕРЕЧНИ ДОКУМЕНТОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ МЭ, И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

В стандартах не вполне чётко и единообразно определены требования к документам, которые должны быть представлены на МЭ на различных этапах ОКР. Прежде всего, это относится к перечням контролируемых параметров и метрологическим цепям, которые представляют при проведении МЭ на этапе ТП. Формы и требования к этим документам приводятся различным образом в военных стандартах, отраслевых документах.

Кроме того, целесообразно учитывать возможные различия таких документов на разных этапах разработки.

Поэтому считаем необходимым конкретизировать формы документов применительно к различным этапам жизненного цикла изделия, а также различным видам аппаратуры и группам ОКР (в том числе, отмеченным в предыдущем пункте).

#### VII. УТОЧНЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ПРИ СОЗДАНИИ ИЗДЕЛИЙ ВТ

В нормативных и методических документах целесообразно однозначно обозначить метрологический статус и требования к техническим устройствам, используемым при контроле параметров изделия на различных этапах ОКР. В частности, следует более явно выделить те случаи, когда строго требуется использовать только средства измерений военного назначения (СИ ВН), а когда допускается использовать просто средства измерений утвержденного типа (из Государственного реестра средств измерений).

Кроме того, целесообразно в явном виде отметить в нормативных документах, что инерциальные навигационные системы не относятся к средствам измерений.

#### VIII. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Для того чтобы установить однозначное и современное решение отмеченных выше вопросов проведения МЭ из-

делий ВТ, полезно разработать соответствующие методические документы.

Такие документы целесообразно разработать на базе «Типовых методик метрологической экспертизы образцов и комплектов вооружения и военной техники» (в 4 книгах), которые были ранее разработаны 32 ГНИИИ МО РФ (в настоящее время – ФГБУ «ГНМЦ» МО РФ) и успешно использовались на практике при проведении МЭ изделий ВТ в соответствии с ГОСТ РВ 8.573.

Поэтому представляется целесообразным доработать указанные «Типовые методики ...» в соответствии с новым комплексом военных стандартов, регламентирующих проведение МЭ изделий, и с уточнениями в отмеченных выше актуальных для практики направлениях. При разработке новой редакции «Типовых методик ...» было бы также целесообразно запросить и обобщить предложения метрологических служб различных организаций, участвующих в МЭ.

Разработка, согласование и внедрение новой редакции «Типовых методик ...» позволит повысить эффективность процедуры МЭ изделий ВТ как одной из важных составляющих процесса МЛО и обеспечения качества изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ РВ 0008–000–2019 ГСИ. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения.
- [2] ГОСТ РВ 0008–003–2019 ГСИ. Метрологическая экспертиза образцов вооружения и военной техники. Организация и порядок проведения.
- [3] ГОСТ РВ 1.1–96 ГСИ. Метрологическое обеспечение вооружения и военной техники. Основные положения.
- [4] ГОСТ РВ 8.573–2000 Метрологическая экспертиза образцов вооружения и военной техники. Организация и порядок проведения.
- [5] Типовые методики метрологической экспертизы образцов и комплектов вооружения и военной техники» (в 4 книгах).

**Abstract — The analysis of the issues of methodological, organizational and technical support of the procedure of metrological examination of military equipment products in accordance with the requirements of new military standards is carried out. The features of the examination at different stages of development work are highlighted, first of all - at the stages of approval of the terms of reference and development of the technical project. Recommendations on concretization and clarification of methodological issues that cause difficulties during the examination are formulated.**

*Key words — metrological support, metrological expertise, technical project, terms of reference.*

# Цифровизация процесса создания новых функциональных материалов для управляющих систем

И. В. Лихачев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (БГТУ «ВОЕНМЕХ») г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: likha4eviv@yandex.ru

**Аннотация** — В статье рассматривается возможность использования нейронной сети при создании новых функциональных материалов для корпусов приборов и устройств. Приводится краткое сравнение программы ANSYS и нейронной сети. Рассмотрены способы обучения нейронной сети, а также кратко разобрана методика проведения процесса обучения нейронной сети. Приведено сравнение способов обучения “с учителем” и “без учителя”. Установлено, что существует возможность внедрения нейронной сети в разработку новых функциональных и композиционных материалов для корпусов приборов и устройств, эффективность которой необходимо доказать путем проведения экспериментов по разработке материалов с помощью нейронной сети.

**Ключевые слова** — нейронная сеть, способы обучения, функциональные материалы, композиционные материалы, автоматизация

## I. ВВЕДЕНИЕ

В приборостроении происходит постоянная модернизация устройств, которые в свою очередь должны отвечать новым, нарастающим требованиям различных сфер деятельности страны таких как судостроение, авиация, промышленность и т.д. Немаловажный аспект в приборостроении является изготовление корпусов. Именно от правильно подобранного материала для изготовления корпуса прибора будет зависеть его способность противостоять агрессивной среде и сберечь внутреннюю начинку от повреждений при различных условиях эксплуатации [1]. В зависимости от требований, предъявленных заказчиком, важно учитывать все возможные внешние воздействия на прибор: механические, электромагнитные, водные, тепловые, радио воздействия и т.д. Внутренние процессы прибора тоже необходимо учитывать. Особенно важно теплоотделение внутренних устройств прибора, так как для обеспечения длительной эксплуатации прибора необходимо подобрать правильный материал для отвода тепла. Существует множество способов и приемов для отвода тепла в приборе, например установка вентиляторов охлаждения, охлаждающих пластин, отверстий для выхода избыточного тепла. Однако все эти методы либо занимают место в корпусе прибора, что мешает добавлению дополнительных узлов для увеличения функционала устройства, либо нарушает целостность корпуса, что ограничивает условия эксплуатации. Например, если в корпусе прибора для отвода тепла установить охлаждающие отверстия, то этот прибор явно не рекомендуется использовать в тех местах, где есть непосредственный контакт с водой. Правильно

подобранный материал дает возможность пассивного охлаждения прибора [3].

С развитием цифровой техники существует перспективная возможность использовать в создании новых функциональных материалах нейронную сеть. Нейронная сеть позволит ускорить процесс создания материала за счет своей особенности обучаться и прогнозировать. Достаточно передать в нейросеть входные данные по желаемым свойствам материала, после чего последует анализ этих данных и вывод состава материала, удовлетворяющий требованиям.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

На данный момент инженеры используют различные системы инженерного анализа (ABAQUS, ANSYS, COSMOS, I-DEAS, NASTRAN, и другие), но для моделирования материалов часто используют ANSYS. Эта программа использует метод конечных моделей и позволяет спрогнозировать механические свойства материалов на основе их состава [2].

Нейронная сеть отличается от ANSYS тем что в последствии обучения ускориться процесс прогнозирования свойств материалов за счет того, что нейронная сеть уже будет иметь “опыт” подбора материалов. В перспективе нейронная сеть сможет давать рекомендации по внедрению того или иного компонента в конечный функциональный материал, что позволит значительно ускорить процесс подбора необходимого материала для корпуса устройства. Процесс подбора материала во многом зависит от способа обучения нейронной сети. На данный момент существует два способа обучения: “с учителем” и “без учителя”. Обучение “с учителем” позволяет задать нейронной сети эталон, к которому она должна прийти в результате своих расчётов. В данном случае эталоном является некий материал, для которого уже известны механические свойства и свойства которого подтверждены экспериментально. Способ обучения “без учителя” подразумевает самостоятельную разработку материала нейронной сетью [4]. При данном обучении сеть имеет только входные данные, которые задают необходимые свойства конечного материала. В начальной стадии развития сети предполагается использовать концепцию обучения “с учителем”. Обучение “с учителем” позволит оценить правильность принятия решения по подбору материала, так как материал заведомо известен. В процессе обучения нейронной сети важную роль играют такие параметры как: функция активации, коррек-

тировка весов, количество слоев и т.д. Эти параметры влияют на скорость выполнения и точность проведения вычислений. Поэтому очень важно правильно подобрать те или иные параметры для нейронной сети чтобы получить необходимый результат. Подбор параметров влечет за собой проведения ряда экспериментов по разработке материала с помощью нейронной сети. Для проведения экспериментов предполагается использовать композитный материал, который обладает свойствами радиопоглощения и тепло отведения. Данный материал был выбран по причине его возможного использования при изготовлении корпусов приборов определенной военной техники [5].

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие цифровой техники позволяет создавать и внедрять новые системы поддержки принятия решения, а также способы автоматизации процессов связанных с разработкой новых приборов и устройств.

Использование нейронной сети при разработке приборов может стать эффективным решением и способствовать дальнейшему развитию более сложных систем разработки и поддержки принятия решения. Эффективность использования нейронной сети в разработки новых композиционных материалов пока не доказана. Для этого необходимо разработать и протестировать нейронную сеть, а также провести ряд экспериментов по созданию материалов с заданными свойствами, оценив эффективность нейронной сети путем сравнения разработанного материала с эталоном, как предписывает способ обучения нейронной сети “с учителем”. Если эффективность будет доказана, то можно приступить к способу обучения “без учителя”.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Варжапетян, А.Г., Глушенко В.В. Системы управления: Исследование и компьютерное проектирование. М.: Вузовская книга, 2012. -328 с.
- [2] Советов, Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 1988. -135 с.
- [3] Марков, А.В., Орешина О.А. Автоматизация процесса принятия решения о составе полимерных композиционных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 10. С. 440–443.
- [4] Рашид, Т. Создаем нейронную сеть / С.Н. Тригуб, В.Р. Гинзбург, А.Г. Гузикович. – СПб.: ООО «Альфа-книга», 2017. – 272 с.
- [5] Дейтел П, Дейтел Х., Искусственный интеллект, большие данные и облачные вычисления // СПб.: Питер, 2020. – 864 с.

**Abstract** — The article considers the possibility of using a neural network in the creation of new functional materials for the enclosures of devices and devices. A brief comparison of the ANSYS program and the neural network is given. The methods of neural network training are considered, as well as the methodology of the neural network training process is briefly analyzed. The comparison of teaching methods “with a teacher” and “without a teacher” is given. It has been established that there is a possibility of introducing a neural network into the development of new functional and composite materials for instrument cases and devices, the effectiveness of which must be proved by conducting experiments on the development of materials using a neural network.

**Key words** — *neural network, learning methods, functional materials, composite materials, automation.*

# Выбор допусков на компоненты новых функциональных материалов в условиях цифровизации

А. В. Марков, О. А. Елисеева

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: olga\_oresh@mail.ru

**Аннотация** — Актуальность предлагаемого теоретического исследования определяется переходом предприятий отечественной промышленности на цифровизацию процессов, в частности компьютерный синтез новых композиционных материалов (КМ). Одним из основных элементов подобных информационных систем являются математические модели типа «состав КМ – свойства КМ». Точность прогнозирования свойств создаваемых КМ во многом определяется строгим выдерживанием рецептуры КМ, т.е. компоненты нового КМ должны иметь определенный допуск на свойства и массогабаритные параметры (нестабильные параметры), который гарантирует получение в производственных условиях КМ с наперед заданными свойствами. Цель исследования – сокращение цикла создания нового КМ с заданными свойствами, за счёт широкого применения компьютерного эксперимента и учета влияния изменения свойств компонентов КМ на свойства нового КМ. Методы исследования включают основные положения общей теории чувствительности, а также аппарат математической статистики. В результате разработаны пути решения задачи назначения допусков на нестабильные параметры компонентов КМ. Предлагаемые в статье рекомендации могут быть использованы при цифровизации процесса создания новых КМ.

**Ключевые слова** — композиционный материал, математическая модель, нестабильный параметр, чувствительность системы, идентификация математической модели, допуск на нестабильные параметры

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно внедряется идея и концепция цифрового производства, цифровой промышленности, цифровой экономики и т.п. Концепция цифровой промышленности должна быть дополнена концепцией цифрового материаловедения, так как именно разработка новых материалов вносит существенный вклад в развитие такой идеологии. При этом необходимо применять современные цифровые методы, в противном случае на разработку новых материалов будет потрачено очень много времени, что в последующем скажется на неконкурентоспособности произведенной продукции. Цифровые методы основаны на разработке математических моделей с применением компьютерного эксперимента.

При разработке математических моделей, описывающих взаимосвязь «состав материала – свойства материала» очень важно учитывать влияние нестабильных параметров,

иначе возникнет погрешность при решении обратной задачи. Под обратной задачей подразумевается, что по обусловленным техническим заданием на создание нового материала с определенными физико-механическими характеристиками выходных и входных параметров находят-ся внутренние параметры (состав) [1-3].

## II. ВЫБОР КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ

Под оптимизацией показателей качества новых функциональных материалов понимается получение наилучших результатов (свойств) при соответствующих условиях. Т.е. задача оптимизации показателей качества сводится к поиску экстремума целевой функции в некоторой области векторного пространства, которая ограничивается набором линейных либо нелинейных равенств и неравенств.

Для получения количественной оценки оптимизируемого показателя качества нового материала применяется такое понятие, как критерий оптимальности.

На основании выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, которая представляет собой зависимость критерия оптимальности от параметров, оказывающих влияние на ее значение. При этом сам вид критерия оптимальности либо целевой функции определяется конкретными условиями задачи оптимизации [4-5].

Для решения задачи оптимизации показателей качества новых функциональных материалов необходимо выполнить следующие шаги:

- выбрать критерий оптимальности для синтезируемого функционального материала;
- выбрать управляющие параметры;
- установить ограничения на эти параметры (к примеру, допустимые значения наполнителя, влияющие на значение коэффициента отражения электромагнитных волн);
- разработать математическую модель свойства материала, которая устанавливает зависимости критерия оптимальности от всех аргументов и учитывает сопутствующие оптимизационной задаче ограничения;
- на основе разработанной математической модели и выбранного критерия оптимальности определить целевую функцию;

- выбрать подходящий метод оптимизации, с помощью которого находятся экстремальные значения показателей качества новых функциональных материалов.

### III. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР ДОПУСКОВ НА НЕСТАБИЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И КОМПОНЕНТОВ

Синтезируемые функциональные материалы (ФМ) могут менять свои свойства (отличаться от расчетных, полученных в результате компьютерного эксперимента) при изменении параметров математической модели вида «состав ФМ – свойства ФМ», например, большая погрешность взвешивания компонентов будущего ФМ, изменения свойств компонентов ФМ с течением времени и т.д. и т.п.). Изучение подобных явлений является предметом теории чувствительности. Синтез ФМ для различных отраслей промышленности должен обязательно включать исследование вопросов чувствительности к характерным параметрическим возмущениям [6].

Рассмотрим свойства ФМ ( $y$ ) (например, механические характеристики, коэффициент отражения электромагнитных волн и др.). Изменение во времени ( $t$ )  $y$  (от партии к партии) в случае, когда нестабильный параметр (например, масса компонентов ФМ) сохраняет номинальное значение  $x_0$ , является номинальным изменением  $y(t, x_0)$ , т.е.  $y(t, x_0) = y_0(t) = y_0$ . Если параметр принимает отличное от номинального значение, то изменение является варьированным, т.е.  $y(t, x) = y(t) = y$ . Разница между варьированным и номинальным изменениями – это дополнительное изменение свойств ФМ, вызванное изменением параметра  $x$ :

$$\Delta y(t, x) = y(t, x) - y(t, x_0). \quad (1)$$

Исследование дополнительного изменения свойств ФМ возможно с привлечением математического аппарата теории чувствительности [6].

Допустим, что вариация  $\Delta x$  стационарна. Тогда дополнительное изменение свойств ФМ (1) может быть разложено в ряд Тейлора по отклонениям параметра в окрестности его номинального значения

$$\Delta y(t, x) = \left. \frac{\partial y(t, x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \Delta x + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 y(t, x)}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} (\Delta x)^2 + \dots \quad (2)$$

Ограничиваясь в (2) членом первого порядка относительно отклонения, получим приближенное выражение для определения дополнительного изменения свойств:

$$\Delta y(t, x) \cong \left. \frac{\partial y(t, x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \Delta x = S_x^y(t) \Delta x \quad (3)$$

Функция  $S_x^y(t)$  является функцией чувствительности первого порядка. Таким образом,

$$S_x^y(t) \Delta x = \left. \frac{\partial y(t, x)}{\partial x} \right|_{x=x_0} \quad (4)$$

При наличии нескольких изменяющихся параметров  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$  необходимо рассмотреть  $m$  функций чувствительности, определяемых аналогично (4).

Допусковый разброс параметров компонентов является одной из причин отклонения характеристик ФМ от расчетных показателей. Непосредственное определение полей допусков на параметры компонентов ФМ представляет сложную задачу. Первые из двух основных препятствий на пути определения допусков на этапе синтеза нового ФМ – это сложность математической модели вида «состав ФМ – свойства ФМ», которая должна учитывать множество параметров и с высокой точностью соответствовать реальному КМ. Второе препятствие – это необходимость учета многочисленных и разноплановых требований: экономических, технологических, организационных. Многие из них не всегда просто сформулировать и еще труднее формализовать.

С практической точки зрения целесообразно рассмотреть более простую задачу, чем определение полей допусков, а именно: определить требования к величинам допусков, вытекающих из требований к стабильности характеристик ФМ. Решением будет допустимая область, при изменении параметров внутри которой, характеристики ФМ удовлетворяют предъявленным требованиям.

Допустим, свойства нового ФМ характеризуются  $k$  показателями  $N_i$ , допустимые отклонения которых  $\Delta N_{ig}$ , и зависят от  $m$  параметров  $x_j$ , номинальные значения которых  $x_{j0}$  известны.

Основой для расчета допусков  $\Delta x_j$  являются следующие неравенства:

$$\sum_{j=1}^m S_{ij} \Delta x_j \leq \Delta N_{ig} \quad \text{и} \quad S_{ij} = S_{x_j}^{N_i} = \frac{\partial N_i}{\partial x_j}. \quad (5)$$

Непосредственно следующие из (1-4). В зависимости от соотношения между количеством неизвестных допусков  $\Delta x_j$  и числом неравенств следует иметь в виду, что допуски на параметры и показатели  $N_i$  могут быть двусторонними, задача решается тем или иным способом. В частности, при  $k > m$  применяется линейное программирование, а при  $k < m$  вводятся дополнительные условия. Например, при  $k=1$ , как правило, применяют условия «равного вклада», предполагающее равенство всех слагаемых в (5).

### IV. ВЫВОДЫ

Таким образом, упростив задачу, создатель нового ФМ избегает трудностей, связанных с необходимостью учета многочисленных и разноплановых требований, но трудности, вызываемые сложностью математической модели, сохраняются. Обойти их можно, во-первых, применяя приближенные методы анализа, основанные на использовании функций чувствительности, во-вторых, решая задачу поэтапно.

При производстве ФМ предъявляются высокие требования к их свойствам, которые определяют значения технологических допусков на нестабильные параметры. Для контроля этих значений возникает необходимость выбора технических средств измерений.

Неучет допусков на нестабильные параметры компонентов будущего ФМ при проведении многокритериальной оптимизации его свойств с определением состава ФМ может привести к большим расхождениям между реальными и прогнозируемыми с применением цифровых технологий свойствами ФМ.

**tolerances to unstable parameters of CM components have been developed. The recommendations proposed in the article can be used to digitalize the process of creating new CM.**

*Key words — composite material, mathematical model, unstable parameter, sensitivity of the system, identification of the mathematical model, tolerance for unstable parameters.*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Марков, А.В. Концепция математического моделирования свойств физико-механических характеристик композиционных материалов/ А.В. Марков, О.А. Орешина // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2020. – № 12. – С. 3-6.
- [2] Марков, А.В. Автоматизация процесса принятия решения о составе полимерных композиционных материалов/ А.В. Марков, О.А. Орешина // Автоматизация. Современные технологии. – 2020. – Т.74. – №10. – С.440-443.
- [3] Марков, А.В. Проблемы и подходы к моделированию характеристик радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов/ А.В. Марков, О.А. Орешина, И.В. Лихачев // Вестник образования и развития науки Российской академии естественных наук. – 2021. – № 2. – С.79-83.
- [4] Марков, А.В. Оценка рисков при оптимизации состава радиопоглощающих дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов/ А.В. Марков, Н.Ю. Ефремов, О.А. Орешина // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2020. – Т.12. – №5. – С.14–21.
- [5] Markov, A.V., Oreshina, O.A., Verification of mathematical models to optimize the composition of radio-absorbing polymer composite materials/ IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall., Krasnoyarsk, Russian Federation, 2021. P. 12009.
- [6] Потапов, А.М. Чувствительность следящих систем: учебн. пособие / А.М. Потапов, А.А. Пугач – Ленингр. мех. ин-т. Л. – 1988. – 70 с.

**Abstract — The relevance of the proposed theoretical study is determined by the transition of domestic industry enterprises to the digitalization of processes, in particular, computer synthesis of new composite materials (CM). One of the main elements of information systems are mathematical models of the type «composition of CM – properties of CM». The accuracy of predicting the properties of the created CM is largely determined by strict adherence to the formulation of CM, that is, the components of a new CM must have a certain tolerance for properties and weight and size parameters (unstable parameters), which guarantees obtaining CM with the pre-set properties in production conditions. The purpose of the study is to shorten the cycle of creating a new CM with specified properties, due to the widespread use of computer experiment and taking into account the influence of changes in the properties of CM components on the properties of the new CM. The research methods include the main provisions of the general theory of sensitivity, as well as the apparatus of mathematical statistics. As a result, ways to solve the problem of assigning**

# Технические средства для межлабораторных сличений при измерениях вносимых помех в бортовое электропитание

А. П. Смирнов, Ф. Г. Колдашов

АО «НПФ «Диполь»

г. Москва, Россия

E-mail: smirnov@dipaul.ru, KoldashovFG@dipaul.ru

Е. А. Смирнова

ООО «Профигрупп»

г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: SmirnovaEA@dipaul.ru

**Аннотация** — В рамках испытаний электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС) в части вносимых искажений в линии питания предложено использовать для межлабораторных сличений программируемый источник питания (ПИП). Выходное напряжение ПИП с внесенными известными искажениями по гармоникам, изменениям и колебаниям напряжения, а также с заданным фликером используется как стабильная мера физической величины, используемая для оценки погрешности испытательной лаборатории. Приводятся примеры результатов измерений.

**Ключевые слова** — межлабораторные сличения, электромагнитная совместимость, гармоники, фликер

## I. ВВЕДЕНИЕ

Измерения искажений, создаваемых техническими средствами (ТС) в подключенных к ним линиях питания, являются обязательной частью сертификационных испытаний ТС различного назначения в области оценки электромагнитной совместимости (ЭМС). Данные требования в полной мере относятся к ТС, эксплуатируемых или связанных с объектами судостроения [1]. К числу этих измерений относятся:

– измерения уровня вносимых гармоник тока частоты питающего напряжения, проводимых в соответствии с [2];

– измерения вносимых отклонений и нестабильности напряжения, а также фликера, проводимых в соответствии с [3].

Кроме указанных стандартов, регламентирующих требования и методы измерений, существует значительное количество продуктовых стандартов, содержащих указанные требования, а также стандарты, аналогичные [2,3], но для токов потребления более 16 А. Сертификационные испытания проводятся в аккредитованных лабораториях с помощью соответствующих поверенных средств измерений. Однако актуальные требования к испытательным лабораториям [4] обуславливают необходимость проведения межлабораторных сличений (МС). В представленном докладе предлагается возможный путь организации МС при измерениях вносимых искажений от ТС в линии питания.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ

Средства измерений (СИ) характеристик вносимых искажений являются достаточно простыми. В техническом

плане представляют по сути встроенный быстродействующий АЦП и некоторое программное обеспечение (ПО), выполняющее измерения указанных характеристик. Обычно данные измерения и требования к характеристикам ТС присутствуют совместно [2,3]. Поэтому рационально рассматривать алгоритмы МС в данных областях измерений параллельно.

Для измерений уровня вносимых гармоник тока процедура состоит в определении частоты и напряжения в сети на основной частоте и вычисление уровня гармонических составляющих на частотах, кратных частоте питающего напряжения, всего до 40 гармоник. Как минимум, обычно измеряется нелинейных искажений, который фактически является некоторой интегральной характеристикой и равный отношению суммы всех гармоник к основной гармонике. Однако часто при испытаниях измерению и проверке подлежит каждая отдельная составляющая. Решение о сертификации ТС принимается по результатам проверки каждой гармоники, что может привести к забраковке ТС по одной составляющей.

СИ уровня вносимых гармоник включают в себя процедуру извлечения временной выборки, выполнение спектрального анализа выборки и оценку соответствующих спектральных составляющих. Понятно, что оценка основной частоты питающего напряжения, а не его номинального значения, имеет существенное значение, а погрешность ее измерений будет накапливаться с ростом номера гармоники. Вероятно, что алгоритмы выполнения измерений должны учитывать этот фактор, принимая, в качестве оценки максимальное значение спектральной составляющей в ближайшей окрестности частоты гармоники. Как видно, в данной области измерений исключительно важно правильность работы ПО. И фактически целью МС должно являться проверка правильности работы ПО, алгоритмы работы которого обычно скрыты.

Поскольку источником появляющихся гармоник напряжения являются нелинейность входной нагрузки ТС, то наиболее естественным путем организации МС являлся бы выбор некоторой нелинейной нагрузки с известными стабильными характеристиками нелинейности и использование ее в качестве эквивалента ТС. Тогда МС могли бы быть реализованы путем сравнительного измерения уровня вносимых нелинейных искажений, создаваемой данной нагрузкой. Однако такой подход обеспечивает измерения только при одном значении номинального тока, в то время



как стандарты нормируют требования к уровням нелинейных искажений для ТС с разными токами, как минимум в диапазоне 16 А.

Поэтому в качестве метода обеспечения МС был выбран иной метод. Суть метода заключалась в изначальном задании питающего напряжения с задаваемыми относительными уровнями гармоник. Данное напряжение питания с внесенными искажениями являлось исходным питанием проверяемого СИ. При этом в качестве объекта испытаний использовалась пассивная линейная резистивная нагрузка. Для этих целей предложено использовать прецизионный программируемый источник питания (ИП), например, источник питания NSG 1005-3 (Ametek) (Рис.1). В нем имеется возможность добавления в выходное напряжение АС гармонических составляющих в требуемом частотном диапазоне.



Рис. 1 – Программируемый источник питания (справа) и СИ искажений сети питания (слева).

Предложения опробовались для СИ типа Proflin 2100 (Ametek) с внедренным ПО WIN 2100. Результаты измерений представлены на Рис.2. Как видно из результатов, СИ корректно измерил вносимых искажения, приняв их как результат нелинейных искажений от нагрузки. Таким образом, предложенный подход может быть использован для МС в части измерений по [2].

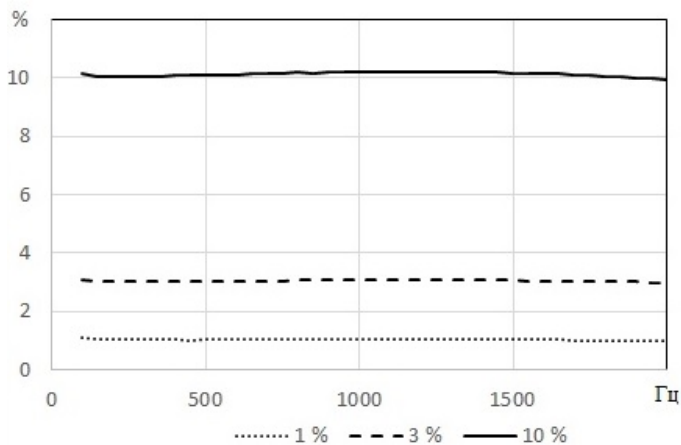


Рис. 2 – Результаты измерений относительного уровня гармоник для заданного уровня гармоник.

Следующим направлением является разработка МС для СИ искажений типа изменения и колебания напряжения, а также фликера. Источником данных помех является нестабильность нагрузки. Обычно среди указанных трех показателей два первых являются обязательными, а измерения фликера обязательны лишь для некоторых ТС.

Измерения изменений и колебаний напряжения основаны на мониторинге среднеквадратических полупериодных напряжений, нормированных относительно устоявшегося напряжения. Национальные стандарты различных

годов выпуска, аналогичные [3] содержат ошибки перевода, касающиеся терминов в области вносимых искажений. Это касается используемых понятий “установившееся напряжение”, “изменение установившегося напряжения” и ряда других понятий и критериев. Поэтому несмотря на то, что собственно процедура регистрации полупериодных напряжений и мониторинг их изменений не должна вызывать трудностей, неоднозначность толкования терминов и критериев, динамические изменения опорных величин, расплывчатость временных моментов для съема измерительной информации могут приводить к различным алгоритмам работы ПО и, следовательно, к погрешности измерений. Таким образом, для измерений данных параметров важна роль используемого ПО и то, насколько его разработчик учел в нем все критерии соответствия выдаваемых оценок. Надо отметить, что [3] вводит некоторый контрольный временной профиль изменения напряжения питания для проверки правильности работы программного обеспечения. Однако, на наш взгляд, данный контроль профиля достаточно прост, содержит лишь однократные явления, отражающие особенности критериев.

В частности, при однократных и быстрых скачках напряжения нет гарантии, что используемое ПО наверняка успеет отследить факт изменения напряжения. В целом, для повышения объективности целесообразно разнообразить используемые профили напряжения, используемые для проверки правильности работы ПО, в том числе с включением в профиль напряжения непродолжительных, но быстрых изменений напряжения. Для этих целей также может быть использован программируемый ИП с заданием совокупности произвольных профилей напряжения питания.

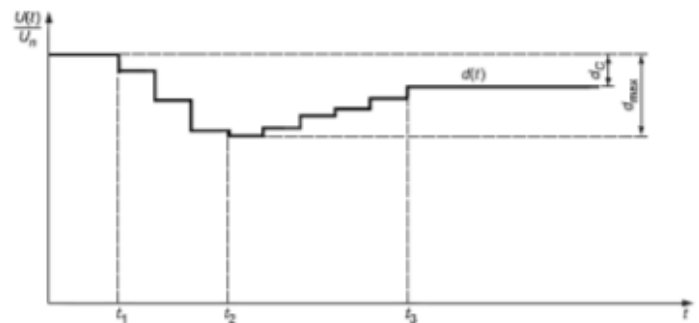


Рис.3 – Пример профиля измерительной информации и оцениваемые значения (изменения и колебания напряжений).

В качестве примера, были выбраны те же ИП NSG 1005-3 с внедренным аттестованным ПО WIN 2100. Результаты сравнения вводимых показателей и данных измерений показали корректность вводимых профилей напряжения более широкой номенклатуры, что обуславливает возможность их использования для тестирований других аналогичных СИ и ПО.

В отличие от рассмотренных ранее, фликер, являющийся мерой физического восприятия мерцания светового потока некоей лампы под действием изменения напряжения в сети, оценивается как результат статистической обработки изменяющегося относительного напряжения сети при подключении ТС. Конструктивно фликерметр состоит из ряда блоков, моделирующих цепь восприятия “свет-человек-мозг”, и блок статистической обработки для вы-

числений дозы фликера (различают кратковременную и долговременную дозу фликера).

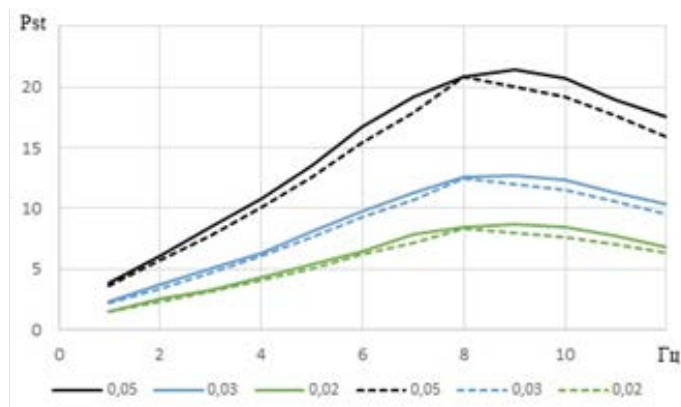


Рис. 4 – Сравнительные результаты (расчет и измерение) фликера Pst для питания с разной АМ (глубина и частота).

Создание амплитудной модуляции питающего напряжения синусоидальной формы или меандра с помощью программируемого ИП (рис. 1) позволяет оценить ожидаемое значение фликера и тем самым проверить правильность работы ПО по оценке фликера. Полученные результаты (рис. 4) показали хорошее совпадение, тем самым подтвердив работоспособность предложенного подхода.

### III. ВЫВОДЫ

1. Для проведения межлабораторных сличений при измерениях вносимых искажениях в линиях питания предложено использовать программируемый источник питания с вводимыми априорно искажениями сети питания.

2. Результаты опробования подхода для измерений вносимых гармоник, изменений и отклонений напряжения, а также фликера показали работоспособность предложенного подхода

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Российский морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. Часть XI. Электрическое оборудование Санкт-Петербург: ФАУ “Российский морской регистр судоходства”, 2019. -226 с.
- [2] ГОСТ ИЕС 61000-3-2-2017. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-2. Нормы. Нормы эмиссии гармонических составляющих тока (оборудование с входным током не более 16 А в одной фазе). Введ. 2018-12-01 – Москва: Стандартинформ, 2018. - 30 с.
- [3] ГОСТ ИЕС 61000-3-3-2015. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 3-3. Нормы. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в общественных низковольтных системах электроснабжения для оборудования с номинальным током не более 16 А (в одной фазе), подключаемого к сети электропитания без особых условий. Введ. 2016-03-01 – Москва: Стандартинформ, 2016. -24 с.
- [4] ГОСТ ISO/IEC 17025-2019. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. Введ. 2019-09-01 – Москва: Стандартинформ, 2021. -32 с.

**Abstract** — As part of the electromagnetic compatibility (EMC) testing of technical equipment, in terms of introduced distortions in the power lines, it was proposed to use a programmable power supply (PPS) for interlaboratory comparisons. The output voltage of the PPS with known

harmonic distortion, voltage variations and fluctuations, as well as a given flicker, is used as a stable measure of the physical quantity used to evaluate the error of the testing laboratory. Examples of measurement results are given.

*Key words* — interlaboratory comparisons, electromagnetic compatibility, harmonics, flicker.

# Способы оценки метрологических характеристик пьезоэлектрических измерительных преобразователей механических колебаний без демонтажа с объектов эксплуатации

Ю. А. Кувыкин, В. В. Супрунюк, А. Г. Максак, А. А. Горбачев  
ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России  
г. Мытищи, Россия  
E-mail: 32gnii@mil.ru

**Аннотация** – Рассмотрены известные способы оценки метрологических характеристик пьезоэлектрических измерительных преобразователей механических колебаний без демонтажа с объектов эксплуатации. Проанализирована методология применения этих способов, представлена их характеристика с точки зрения достоверности измерительной информации и прослеживаемости измерений. Предложены новые решения и практические рекомендации по повышению достоверности (точности) измерительной информации при оценке метрологических характеристик преобразователей с учетом требований действующей нормативно-технической документации, регламентирующей методы и средства их поверки.

**Ключевые слова** – пьезоэлектрический преобразователь, бездемонтажная поверка, виброускорение, пьезоэффект, частота установочного резонанса

## I. ВВЕДЕНИЕ

Существующие методики поверки пьезоэлектрических измерительных преобразователей (ПИП), как правило, основаны на традиционных методах передачи единицы средствам измерений (СИ), при этом определение нормированного значения воздействующей на СИ величины осуществляется или абсолютным методом, или методом непосредственного сличения с эталонными преобразователями. Для проведения поверки необходимо демонтировать ПИП с места эксплуатации и доставить в поверочную лабораторию. Однако бывают случаи, когда демонтаж ПИП с места эксплуатации невозможен или нецелесообразен. При этом рекомендации в действующих нормативных документах, позволяющие разрабатывать методики бездемонтажной поверки, на сегодняшний день не сформированы.

С учетом указанного выше, целями настоящего исследования являются:

1. Анализ особенностей применения способов оценки метрологических характеристик ПИП без демонтажа с целью определения их основных достоинств и недостатков при использовании в методиках поверки.

В работе рассмотрены три перспективных способа для реализации в технических решениях методик бездемонтажного контроля метрологических характеристик ПИП:

- способ оценки метрологических характеристик ПИП, основанный на методе замещения [1, 2];

- способ оценки метрологических характеристик ПИП, основанный на применении «биморфа» [3];

- способ контроля частоты установочного резонанса ПИП с применением короткого импульса напряжения переменного тока [4].

2. Предложение обоснованных решений и практических рекомендаций, позволяющих повысить достоверность измерительной информации и прослеживаемости проводимых измерений.

3. Экспериментальная апробация одного из рассматриваемых способов с учетом предлагаемых решений и рекомендаций.

## II. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБОВ ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИП БЕЗ ДЕМОНТАЖА

Рассматриваемые в работе ПИП предназначены для преобразования механических колебаний контролируемого объекта в электрический сигнал, пропорциональный ускорению при прямолинейном колебательном движении (виброускорению) выделенного участка технического устройства, в котором они размещены (пьезоэлектрические вибропреобразователи). Их принцип действия основан на генерации электрического сигнала, пропорционального воздействующему виброускорению. В конструкции вибропреобразователей использована механическая схема с пьезоэлементом, реагирующим на сдвиг (смещение). При этом воздействующие на основание вибропреобразователя механические колебания приводят к тому, что на пьезоэлемент действует динамическая сила, равная произведению ускорения инерционной массы на ее значение.

В настоящее время пьезоэлектрические вибропреобразователи нашли широкое применение для измерений механических колебаний в различных областях науки и техники, так как обладают следующими достоинствами:

- широким диапазоном рабочих частот;

- линейной амплитудной характеристикой в динамическом диапазоне;
- высокой стойкостью к воздействующим факторам окружающей среды;
- долговечностью конструкции;
- малыми габаритами и компактностью конструкции.

В практике преобладают преобразователи, которые используют прямой пьезоэффект. В то же время в некоторых типах преобразователей имеет место применение и обратного пьезоэффекта. При обратном пьезоэффекте воздействие внешнего электрического поля вызывает относительное смещение положительных и отрицательных ионов, что приводит к деформации кристалла (формы пьезоэлемента).

Эффект обратимости пьезоэлемента нашёл широкое применение в конструкциях ПИП для оценки их метрологических характеристик без демонтажа с объектов эксплуатации [1, 2, 3]. Так, в способе [1] пьезоэлемент вибропреобразователя возбуждают нормируемым электрическим сигналом последовательно на частотах, составляющих его рабочий диапазон. Выполняют эту процедуру путем подачи от внешнего генератора синусоидального сигнала напряжения замещения виброускорения преобразователя, полученного в результате измерения падения напряжения на резисторе, включенном относительно пьезоэлектрической части ПИП на землю и находящемся во встроеном усилителе, возбужденном при первичной проверке заданным значением виброускорения на заданной частоте. Мерой для оценки метрологических характеристик вибропреобразователя является нормированный электрический сигнал, воздействующий на пьезоэлемент и непосредственно воспроизводящий отклик на механическое колебание (ускорение) пьезоэлемента, которое подлежало измерению. В этом случае метрологическая прослеживаемость обеспечивается к государственным эталонам электрического напряжения. Однако при периодической проверке определяется коэффициент замещения, который не является коэффициентом преобразования (условно его можно назвать аналогом). Он определяется при периодической проверке без воздействия на вход ПИП виброускорения. Воздействие известного значения физической величины лишь подразумевается при условии, что напряжение при первичной и периодических проверках неизменно. Если параметры ПИП, кабеля и согласующего усилителя за интервал между проверками не изменились, то считается, что полученный методом замещения коэффициент преобразования равен коэффициенту преобразования ПИП, определенному на поверочной виброустановке [4]. Указанный подход для оценки метрологических характеристик без демонтажа с объектов эксплуатации применен также и для пьезоэлектрических гидрофонов [2].

Известен другой способ оценки метрологических характеристик вибропреобразователей без демонтажа с объектов эксплуатации. Вибропреобразователь, в котором реализован указанный способ оценки его метрологических характеристик, конструктивно состоит из основания, пьезоэлемента, инерционной массы, контакта для снятия электрического сигнала. В его конструкции использована механическая схема пьезоэлемента, состоя-

щая из керамического диска, наклеенного на металлический диск со стержнем посередине. Инерционная масса опирается на края металлического диска. Для согласования вибропреобразователя с линией связи используется зарядовый усилитель, собранный по дифференциальной схеме. Для такого вибропреобразователя была использована «грибковая» конструкция чувствительного элемента. Она образована «биморфом», состоящим из керамического диска, наклеенного на металлический диск со стержнем посередине. При этом инерционная масса опирается на края металлического диска. В рассматриваемых ПИП предусмотрена специальная система, состоящая из возбудителя и генератора, для проведения бездемонтажного контроля исправности и стабильности характеристик посредством обратного пьезоэффекта, создаваемого на «биморфе» ПИП. Мерой для оценки метрологических характеристик такого вибропреобразователя является электрический сигнал в форме меандра, воздействующий на пьезоэлемент. Воздействие сигнала в виде меандра вызывает деформацию «биморфа», от которого механическое колебание передается на измерительный пьезоэлемент преобразователя. В результате электрическим воздействием воспроизводят механическое колебание, равнозначное требуемому при измерении [3].

С точки зрения повторяемости измерений, первый способ обеспечивает более достоверные значения. В этом же способе эффект воздействия на пьезоэлемент электрическим сигналом вызывает непосредственный механический отклик, отвечающий предъявляемым требованиям к преобразователю. Однако по достоверности измерительной информации в части погрешности измерений и надежности он уступает первому. Это обусловлено применением дополнительного элемента передачи воздействия (мембрана, разделяющая «биморф» и чувствительный элемент). Электрическим воздействием по принципу обратного пьезоэффекта деформируется «биморф», который посредством мембраны передает механическое колебание на пьезоэлемент преобразователя. Результат такого подхода вводит дополнительную составляющую погрешности и будет представлять более сложную измерительную цепочку.

Особого внимания заслуживает способ контроля частоты установочного резонанса ПИП с применением короткого импульса напряжения переменного тока [5]. Определение частоты установочного резонанса в данном случае производится следующим образом:

1. На пьезоэлемент подается короткий импульс напряжения переменного тока.

2. Пьезоэлемент ПИП преобразует его в короткий механический импульс, который заставляет колебаться его инерционную массу.

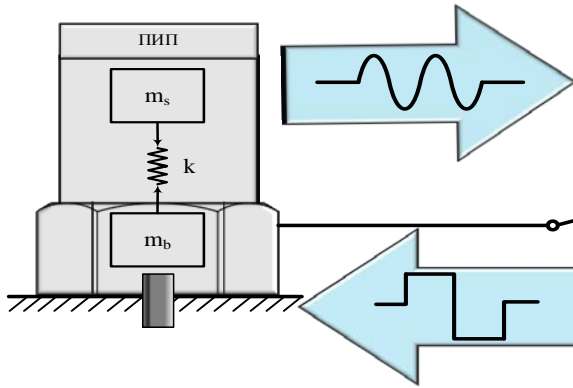
3. На выходе ПИП измеряется частота синусоидальных колебаний электрического сигнала, пропорционального механическим колебаниям сейсмической массы. Измеренная частота и является частотой установочного резонанса ПИП ( $f_m$ ) [6]:

$$f_m = \frac{\sqrt{k/m_s}}{2\pi} \quad (1)$$

где  $k$  – эквивалентная жесткость пьезоэлемента;

$m_s$  – общая сейсмическая (инерционная) масса.

Данная процедура реализована в усилителях измерительных NEXUS фирмы «Brüel & Kjær Sound & Vibration A/S» (Дания) для оценки качества крепления ПИП, а



также контроля подключения измерительного кабеля к ПИП [7].

Схематично описанная процедура представлена на рисунке 1.

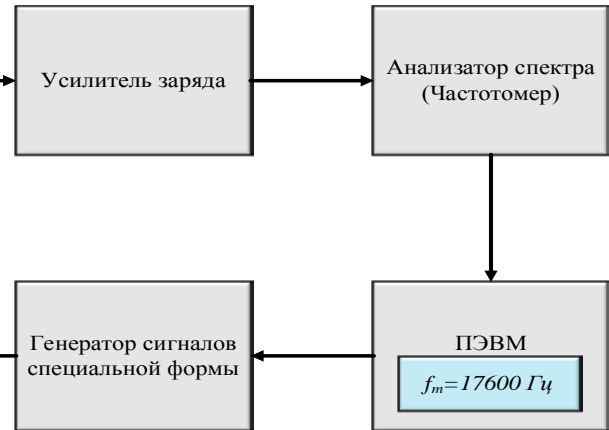


Рис. 1 – Схема контроля частоты установочного резонанса ПИП

Приведенный способ применяется для контроля следующих ситуаций:

- ПИП не закреплен на конструкции (измеренная частота установочного резонанса значительно больше, чем нормированная частота установочного резонанса закрепленного ПИП);
- ПИП закреплен на конструкции с недостаточным крутящим моментом затяжки (измеренная частота установочного резонанса значительно меньше, чем частота установочного резонанса закрепленного ПИП);
- масса ПИП слишком велика по отношению к массе конструкции, на которой он установлен (измеренная частота установочного резонанса больше, чем нормированная частота установочного резонанса закрепленного ПИП);
- отсутствует отклик ПИП (обрыв соединительного кабеля).

У изложенного выше способа есть значительное преимущество по отношению к рассмотренным ранее. В случае, когда преобразователь по тем или иным причинам теряет механический контакт с конструкцией, контроль по значению частоты установочного резонанса мгновенно это зафиксирует. При использовании других рассмотренных способов такого не будет, и при воздействии электрического сигнала пьезоэлемент покажет, что все в норме. С точки зрения готовности изделия к применению, подобный недостаток очень существенный.

### III. РАЗРАБОТКА ОБОСНОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Авторам исследований представляется, что Авторам исследований представляется, что некоторыми техническими решениями и практическими рекомендациями можно повысить достоверность измерительной информации и усовершенствовать методологию рассмотренных способов. К примеру, изменить форму электрического сигнала на широкополосный в диапазоне рабочих частот ПИП, который позволит сформировать получение

сведений о частотной характеристике (ЧХ) преобразователя, а также существенно сократить время измерений [8].

Результаты анализа особенностей применения рассмотренных способов, а также предложения по совершенствованию приведены в таблице 1.

Представляется возможным также использовать в указанных способах теорию по анализу передаточных функций, описывающих воздействие электрического сигнала на пьезоэлемент с точки зрения устойчивости переходных процессов и получения дополнительной информации о поведении механической системы. Таким образом, появится возможность уточнить составляющие погрешности рассматриваемого измерительного процесса. Допустим, что колебание пьезоэлемента описывается передаточной функцией второго порядка, т.е. пьезоэлемент представляет колебательное звено второго порядка. Управление параметрами переходного процесса достигается с помощью варьирования формой и свойствами воздействующего электрического сигнала. При этом следует учитывать упругие свойства непосредственно применяемого пьезоэлемента и среды, в которой он эксплуатируется. Прототипом для проведения таких исследований могут послужить предложения авторов [9]. Исследования и испытания в данном направлении активно выполняются и планируются к дальнейшему развитию. Предварительные результаты этих исследований свидетельствуют о положительном выборе указанного подхода.

### IV. ПРАКТИЧЕСКАЯ АПРОБАЦИЯ ПРЕДЛОЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ

Экспериментальная апробация была проведена для способа определения частоты установочного резонанса ПИП, как менее апробированного, по мнению авторов, в отечественной метрологической практике.

Для проведения экспериментальной апробации был собран исследовательский измерительный комплекс,

ТАБЛИЦА 1

№ п/п	Наименование способа	Достоинства	Недостатки	Предложения по совершенствованию
1	Способ оценки метрологических характеристик ПИП, основанный на методе замещения	1. Реализована прослеживаемость к эталонам напряжения переменного тока 2. Обеспечена высокая повторяемость измерений при периодической поверке 3. Прошел апробацию в методиках поверки на аппаратуру M052.11 комплексы M052.02	1. Применение синусоидального сигнала приводит к большим временным затратам при определении ЧХ ПИП в рабочем диапазоне частот. 2. Не позволяет контролировать качество установки ПИП на конструкцию. 3. Изменение характеристик пьезомодуля (и соответственно коэффициента преобразования) ПИП в процессе старения керамики или воздействия на ПИП электрических или магнитных полей, механических ударов без изменения емкости и, следовательно, коэффициента замещения может привести к снижению точности измерений	1. Применение широкополосных сигналов возбуждения позволит в разы сократить время проведения измерений в рабочем диапазоне частот. 2. Определение частоты установочного резонанса ПИП позволит контролировать качество установки ПИП на конструкцию (реализовано). 3. Проведение дополнительных исследований соотношения коэффициента замещения и коэффициента преобразования ПИП для повышения достоверности измерительной информации и прослеживаемости измерений
2	Способ оценки метрологических характеристик ПИП, основанный на применении «биморфа»	1. Применение сигнала в виде меандра при контроле характеристик ПИП позволяет снизить влияние шумов на результаты измерений. 2. Применение «биморфа» позволяет воспроизводить на чувствительный элемент ПИП механическое воздействие, а не электрическое возбуждение	1. Применение меандра позволяет контролировать коэффициент преобразования только на базовой частоте без учета неравномерности ЧХ ПИП. 2. Не позволяет контролировать качество установки ПИП на конструкцию	1. Применение широкополосных сигналов возбуждения позволит определять неравномерность частотной характеристики ПИП наряду с коэффициентом преобразования на базовой частоте без существенного увеличения времени. 2. Определение частоты установочного резонанса ПИП позволит контролировать качество установки ПИП на конструкцию
3	Способ контроля частоты установочного резонанса ПИП с применением короткого импульса напряжения переменного тока	1. Позволяет контролировать качество установки ПИП на конструкцию. 2. Не требует внесения в схему дополнительного (балластного) сопротивления	1. Не позволяет контролировать коэффициент преобразования ПИП на базовой частоте. 2. Не определены показатели точности проведения измерений	1. Комбинация с одним из приведенных выше способов позволит определять коэффициент преобразования на базовой частоте. 2. Определение показателей точности при выполнении требований действующей НТД позволит применять способ в методиках бездемонтажной поверки ПИП для контроля неравномерности ЧХ ПИП

состоящий из следующих средств измерений и вспомогательного оборудования:

1. Системы измерительной виброакустической ВС-321 (поверочная виброустановка 2-го разряда).
2. Персонального компьютера (ноутбук).
3. Акселерометра пьезоэлектрического 4370.
4. Установки для определения частоты установочного резонанса ПИП с приспособлением для реализации механического удара шариком [10].
5. Усилителя измерительного NEXUS.

При апробации были выполнены следующие процедуры:

- проведены измерения частоты установочного резонанса акселерометра пьезоэлектрического 4370 с применением короткого импульса напряжения переменного тока с использованием усилителя измерительного NEXUS;

- проведены измерения частоты установочного резонанса акселерометра пьезоэлектрического 4370 механическим способом с применением приспособления для реализации механического удара шариком в соответствии с рекомендациями [10];

- рассчитана неравномерность частотной характеристики акселерометра пьезоэлектрического 4370 в соответствии с рекомендациями [10];

- проведено определение неравномерности ЧХ акселерометра 4370 с применением поверочной виброустановки;

- проведен сравнительный анализ полученных результатов с экспериментальным определением показателей точности.

На рисунке 2 приведено отчетное устройство усилителя измерительного NEXUS с результатом измерений. Значение частоты установочного резонанса акселерометра пьезоэлектрического 4370 составило 17600 Гц.



Рисунок 2 – Отчетное устройство усилителя измерительного NEXUS с результатом измерений частоты установочного резонанса акселерометра пьезоэлектрического 4370

Для определения частоты установочного резонанса акселерометра пьезоэлектрического 4370 с применением механического удара стального шарика использовалось устройство, разработанное сотрудниками компании «ВИСОМ» совместно со специалистами ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России [11].

Реализованная установка включает в себя:

- систему управления вибрационными испытаниями и регистрации сигналов ВС-407, которая имеет частоту дискретизации до 256 кГц и, соответственно, позволяет обнаруживать резонансы с частотой до 100 кГц;
- программное обеспечение «VisAnalyser», предназначенное для записи и анализа сигналов с ВС-407;
- набор рабочих тел из стали с диаметрами от 22 до 75 мм с высверленным отверстием под резьбу M5 для крепления датчиков.
- шарики диаметром от 2 до 6 мм;
- приспособление с кронштейном и трубками.

Внешний вид приспособления с рабочим телом диаметром 75 мм для реализации механического удара шарика приведен на рисунке 3.



Рисунок 3 – Приспособление для реализации механического удара шариком с рабочим телом диаметром 75 мм

На рисунке 4 приведены спектры сигналов с акселерометра 4370 при трех последовательных ударах шариком (рабочее тело диаметром 75 мм, как видно из рисунка, значение частоты установочного резонанса составило 17856 Гц.

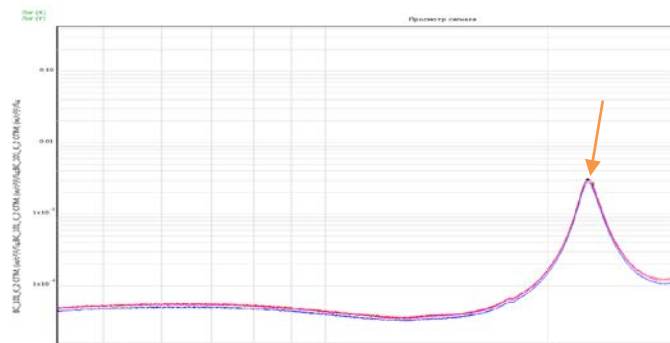


Рисунок 4 – Спектры сигналов с акселерометра 4370 при трех последовательных ударах шариком (рабочее тело диаметром 75 мм)

В соответствии с [10] при периодической проверке пьезоэлектрического вибропреобразователя допускается определять неравномерность его частотной характеристики ( $\gamma$ , %) расчетным путем по следующей формуле:

$$\gamma = \left[ \frac{1}{1 - \left( \frac{f_{\max}}{f_{\text{ycm}}} \right)^2} - 1 \right] 100 \quad (1)$$

где  $f_{\max} = 4800$  Гц – верхнее значение частоты рабочего диапазона частот пьезоэлектрического акселерометра 4370 (описание типа) [12];

$f_{\text{ycm}1} = 17600$  Гц – измеренное значение частоты установочного резонанса акселерометра 4370 с применением короткого импульса напряжения переменного тока с использованием усилителя измерительного NEXUS (рисунок 2);

$f_{\text{ycm}2} = 17856$  Гц – измеренное значение частоты установочного резонанса акселерометра с применением механического удара стального шарика (рисунок 3).

При этом в соответствии с описанием типа на акселерометр пьезоэлектрический 4370 частота установочного резонанса должна быть не менее 16000 Гц [12].

После подстановки измеренных значений в формулу (2) были получены следующие значения неравномерности ЧХ акселерометра:

$\gamma_{\text{П1}} = 8,04$  % – рассчитанное значение неравномерности частотной характеристики акселерометра пьезоэлектрического 4370 на основании частоты установочного резонанса, определенной с применением короткого импульса напряжения переменного тока;

$\gamma_{\text{П2}} = 8,79$  % – рассчитанное значение неравномерности частотной характеристики акселерометра пьезоэлектрического 4370 на основании частоты установочного резонанса, определенной с применением механического удара стального шарика.

Далее была определена ЧХ акселерометра пьезоэлектрического 4370 с применением системы измерительной виброакустической ВС-321 (поверочная виброустановка 2-го разряда). Результаты определения отклонения коэффициента преобразования от значения на базовой частоте 160 Гц приведены на рисунке 5.

Как видно из рисунка, неравномерность ЧХ акселерометра пьезоэлектрического 4370, определенная с применением системы измерительной виброакустической ВС-321, составила  $\gamma_{\Sigma} = 8,43\%$ .

Таким образом, относительная разность определения неравномерности частотной характеристики акселерометра 4370 составила:

- с применением механического удара стального шарика и на ВС-321 – минус 0,39 %;

- с применением короткого импульса напряжения переменного тока и на ВС-321 - 0,36 %;

- с применением механического удара стального шарика и короткого импульса напряжения переменного тока - 0,75 %.

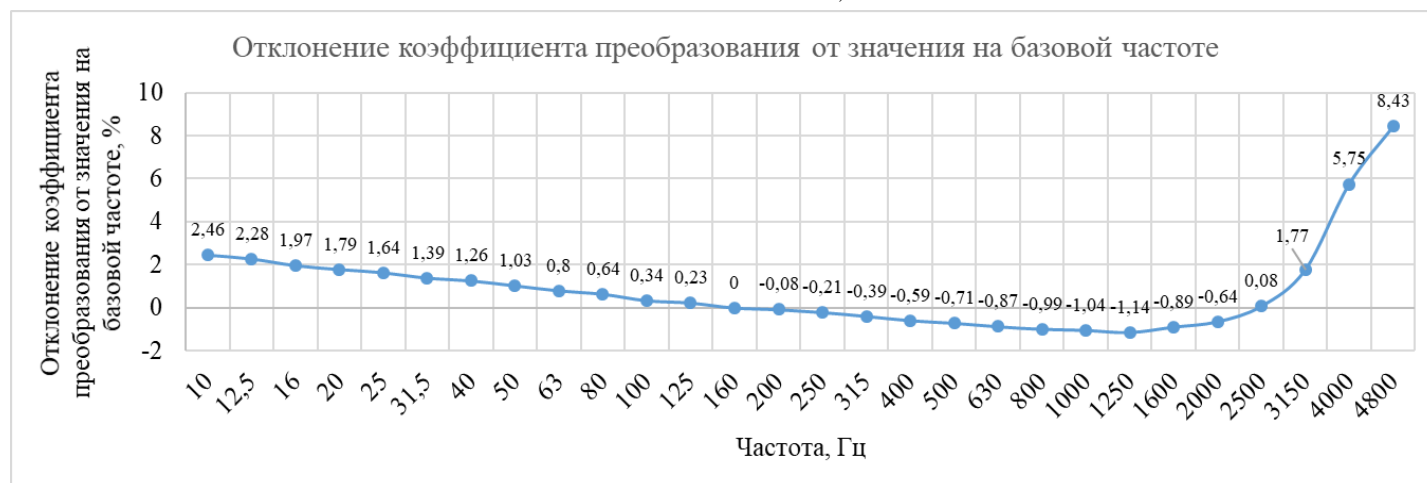


Рисунок 5 – График отклонения ЧХ акселерометра 4370 от значения на базовой частоте 160 Гц

При этом у системы измерительной виброакустической ВС-321 доверительные границы относительных погрешностей в исследуемом диапазоне частот составляют  $\pm 5\%$ .

Результаты апробации доказывают, что применение способа контроля частоты установочного резонанса ПИП с применением короткого импульса напряжения переменного тока позволяет:

1. Контролировать качество установки ПИП на конструкцию.
2. Определять неравномерность ЧХ ПИП как основную нормированную метрологическую характеристику при периодической поверке без демонтажа с объекта эксплуатации.

При этом доказана сходимость результатов измерений с традиционными методами определения неравномерности ЧХ, регламентированными действующей нормативно-технической документацией [10].

## V. ВЫВОДЫ

Проведенные в работе исследования позволили:

1. Провести анализ особенностей применения способов оценки метрологических характеристик ПИП без демонтажа с целью определения их основных достоинств и недостатков при использовании в методиках поверки.
2. Предложить обоснованные технические решения и практические рекомендации, позволяющие повысить достоверность измерительной информации и прослеживаемость проводимых измерений.

3. Провести экспериментальную апробацию предложенных решений на одном из способов, при этом доказать сходимость результатов измерений с традиционными методами определения неравномерности ЧХ, регламентированными действующей нормативно-технической документацией.

Внедрение описанных способов оценки метрологических характеристик пьезоэлектрических измерительных преобразователей механических колебаний без демонтажа с объектов эксплуатации способствует существенному уменьшению временных и материальных затрат, повышению автономности применения объектов. В свою очередь, совместное применение рассмотренных способов позволит повысить достоверность измерительной информации и усовершенствовать методологию бездемонтажной поверки.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Иванов, Ю.М. Способ поверки пьезоэлектрического вибропреобразователя без монтажа с объекта установки / Ю.М. Иванов, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Пат. RU 2358244 Заявл. 26.09.2007/опубл. 06.10.2009. - Бюл. № 21.
- [2] Иванов, Ю.М. Способ поверки пьезоэлектрического гидрофона без монтажа с объекта установки / Ю.М. Иванов, В.В. Супрунок, Б.В. Косенков, В.А. Ураков / Пат. RU 2439841 Заявл. 25.08.2010/опубл. 10.01.2012. - Бюл. № 11.
- [3] БИГЮ.408119.040РЭ «Акселерометр пьезоэлектрический. Руководство по эксплуатации», 2018. - 11 с.
- [4] Кувыкин, Ю.А. Вариант реализации бездемонтажной поверки пьезоэлектрических вибропреобразователей методом замещения / Ю.А. Кувыкин, А.С. Николаенко// мат. XXXVII НТК молодых ученых – военных метрологов / Мытищи, МО, 2012. - С. 29-32.
- [5] Скворцов, Д.В. Способ определения значения частоты установочного резонанса пьезоэлектрического вибропреобразователя и устройство для его осуществления / Д.В. Скворцов, А.В. Орлов, А.Л. Блохин / Пат. RU2593646C1 Заявл. 22.05.2015/опубл. 10.08.2016. - Бюл. № 22.



- [6] Серридж, М. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям / Марк Серридж, Торбен Р. Лихт // Оффсетная печать. – Ларсон и сын. Глоструп. Дания, 1987. – 187 с.
- [7] Technical Documentation/ The NEXUSTM Range of Conditioning Amplifiers Types 2690, 2691, 2692 and 2693. User Manual: Operation and Interface, 2007. – 122 p.
- [8] Серридж, М. Справочник по пьезоэлектрическим акселерометрам и предусилителям / Марк Серридж, Торбен Р. Лихт // Оффсетная печать. – Ларсон и сын. Глоструп. Дания, 1987. – 187 с.
- [9] Кувькин, Ю.А. Исследование метода определения частотной характеристики вибропреобразователей с применением широкополосной случайной вибрации / Ю.А. Кувькин, В.А. Кулак, И.Н. Соколов // Вестник метролога, 2018, № 2. – С. 8-12.
- [10] Исаев, А.Е. Способ градуировки гидрофона по полю при излучении непрерывного сигнала в измерительном бассейне с отражениями / А.Е. Исаев, А.Н. Матвеев, С.В. Сильвестров// Патент РФ №2390968 С2. Кл. Н04R 29/00. Оpubл. 27.05.2010 - Бюл. № 11.
- [11] ГОСТ Р 8.669-2009 ГСИ. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки. Москва. Стандартинформ, 2010. – 103 с.
- [12] Кувькин, Ю.А. Исследование метода определения частоты установочного резонанса пьезоэлектрического вибропреобразователя с применением механического удара стального шарика /
- [13] Ю.А. Кувькин, И.Н. Соколов // Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в РФ: мат. XII Всероссийской НТК. - пос. Поведники, 2018. - С. 97-103.
- [14] Акселерометры пьезоэлектрические серии 4300. Описание типа. Регистрационный номер в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений 39667-08, 2008. – 7 с.

**Abstract — Known methods for estimating the metrological characteristics of piezoelectric measuring transducers of mechanical vibrations without dismantling from operating objects are considered. The methodology for the application of these methods is analyzed, their characteristics are presented in terms of the reliability of measurement information and the traceability of measurements. New solutions and practical recommendations are proposed to improve the reliability (accuracy) of measurement information when assessing the metrological characteristics of transducers, considering the requirements of the current regulatory and technical documentation that regulates the methods and means of their verification.**

*Key words — piezoelectric converter, unmountable verification, vibration acceleration, piezoelectric effect, frequency of the installation resonance.*

# О влиянии ошибок округления на обеспечение корректности выводов в задачах проверки статистических гипотез

Б. Ю. Лемешко  
ФГБОУ ВО «НГТУ»  
г. Новосибирск, Россия  
E-mail: Lemeshko@ami.nstu.ru  
<https://ami.nstu.ru/~headrd/>

## I. О СОСТОЯНИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

Рассказывая на СУДОМЕТРИКЕ–2018 о проблемах, связанных с применением критериев проверки статистических гипотез в задачах метрологического обеспечения, анализа результатов измерений, контроля и испытаний, я отмечал следующее: существующий аппарат прикладной математической статистики крайне ограничено и/или неэффективно используется в задачах метрологии.

Из обширного множества критериев, предназначенных для проверки различных статистических гипотез, в задачах метрологического обеспечения, анализа результатов измерений, контроля и испытаний используется лишь очень ограниченный круг.

Ряд очень перспективных критериев, которые «буквально напрашиваются» для применения в приложениях (как, например, критерии однородности законов или однородности дисперсий в задачах лабораторных сличений), практически там не используются.

Частую критерии используются в условиях нарушения стандартных предположений, обуславливающих возможность их применения, что приводит к некорректности статистических выводов. К некорректности выводов может приводить и наличие ошибок округления, какие бы «сверхточные» измерения не проводились. За прошедшие 4 года существенных изменений с состоянием в лучшую сторону не произошло.

Объективными и субъективными причинами такого состояния являются следующие:

1. Отсутствует доступная информация о существовании соответствующего математического аппарата (о соответствующих критериях).
2. Реальные свойства критериев при ограниченных объемах анализируемых выборок могут существенно отличаться от асимптотических свойств (много примеров).
3. Возможность применения многих критериев ограничена отсутствием информации о распределениях статистик этих критериев при справедливости проверяемой гипотезы. В связи с чем приходится опираться на ограниченные таблицы критических значений.

4. Отсутствует доступная информация о том, что происходит с критериями (с распределениями их статистик) в условиях нарушения стандартных предположений, в том числе под влиянием ошибок округления.

5. Отсутствует информация о достоинствах и недостатках отдельных критериев, о преимуществе в мощности тех или иных критериев из группы критериев, ориентированных на проверку одной и той же гипотезы, что позволило бы выбрать наиболее предпочтительный критерий.

6. Отсутствие программного обеспечения для использования соответствующих критериев, гарантирующего корректность выводов, как в условиях стандартных предположений, так и в условиях конкретных приложений.

7. Негативное влияние «Руководства по выражению неопределенности измерения», тормозящее использование новых результатов в области прикладной математической статистики.

8. Человеческий фактор, не всегда способствующий лучшим решениям, а в задачах метрологии – использованию статистических методов. Лица, принимающие решения об использовании, не всегда обладают нужными компетенциями в оценке возможностей статистических методов.

## II. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОВЕРКЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ГИПОТЕЗ

С каждым из используемых для проверки гипотезы  $H_0$  критериев связана статистика  $S$ , которая представляет собой некоторую меру для измерения вероятности соответствия (несоответствия) анализируемых выборок проверяемой гипотезе  $H_0$ . При справедливости проверяемой гипотезы  $H_0$  статистика  $S$  подчиняется некоторому распределению  $G(S|H_0)$ .

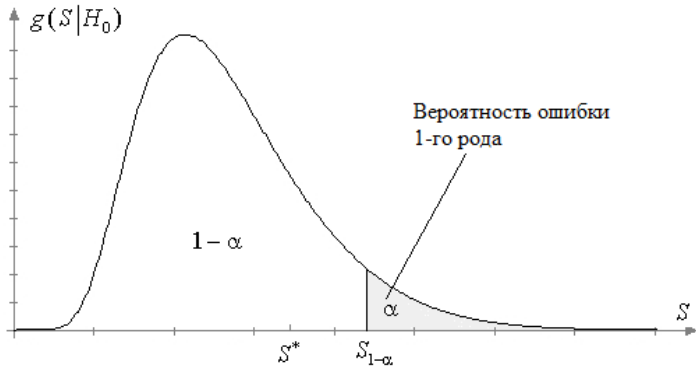


Рис. 1 – Плотность распределения статистики при справедливости гипотезы  $H_0$  и критическое значение для правостороннего критерия

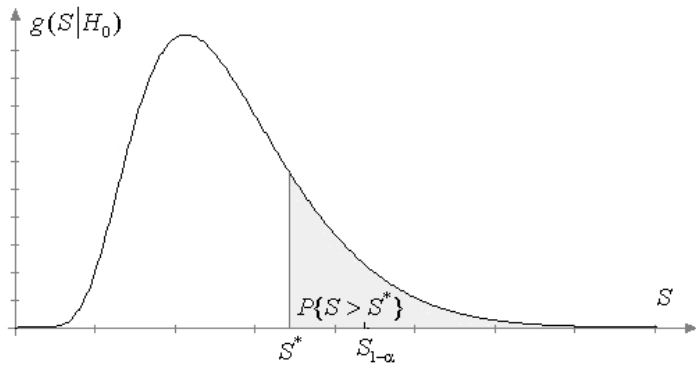


Рис. 2 – Плотность распределения статистики при справедливости гипотезы  $H_0$  и достигнутый уровень значимости

$$P_{value} = P\{S > S^*\} = \int_{S^*}^{\infty} g(s|H_0) ds = 1 - G(S^* | H_0)$$

Если задана конкурирующая гипотеза  $H_1$ , то можно говорить об ошибке 2-го рода и её вероятности

$$\beta = \int_{-\infty}^{S_{1-\alpha}} g(s|H_1) ds$$

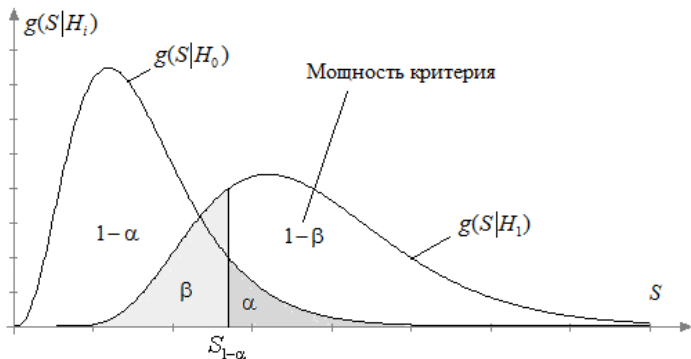


Рис. 3 – Плотности распределения статистик при справедливости соответственно гипотез  $H_0$  и  $H_1$  в случае правостороннего критерия

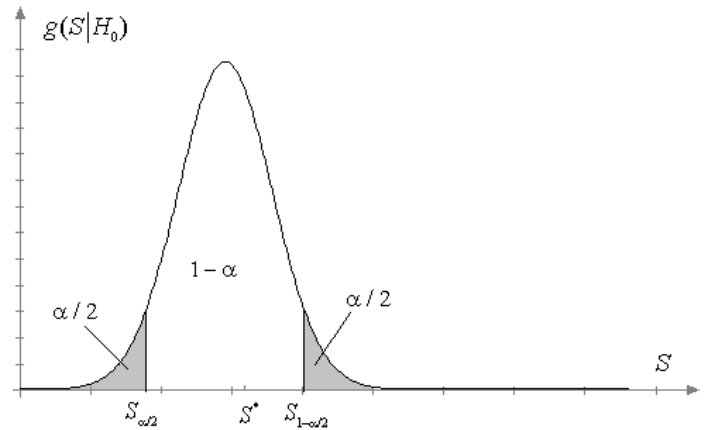


Рис. 4 – Плотность распределения статистики при справедливости гипотезы  $H_0$  и критические значения для двустороннего критерия

$$P_{value} = 2 \min \{G(S^* | H_0), 1 - G(S^* | H_0)\}$$

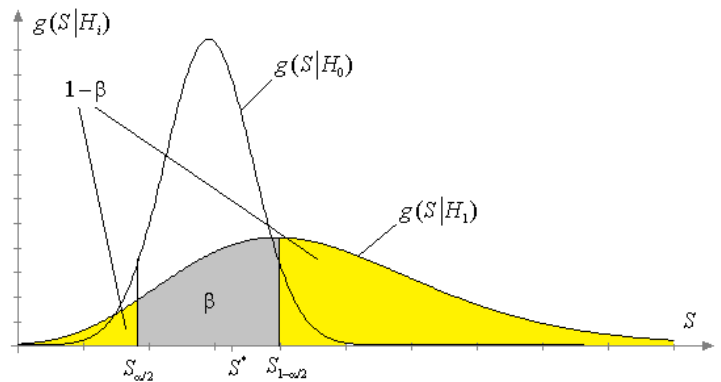


Рис. 5 – Плотности распределения статистик при справедливости соответственно гипотез  $H_0$  и  $H_1$  в случае двустороннего критерия

Предпочтительней использовать более мощные критерии.

### III. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СОГЛАСИЯ

На «СУДОМЕТРИКЕ–2018» говорилось о проблемах, связанных с некорректным применением непараметрических критериев согласия, вследствие которых выводы о результатах проверки гипотез могут оказываться неверными. Речь шла о применении критериев согласия Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлинга, Купера, Ватсона, критериев Жанга.

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  $\theta$  – известное значение параметра (скалярного или векторного).

Сложная проверяемая гипотеза имеет вид  $H_0: F(x) \in \{F(x, \theta), \theta \in \Theta\}$ , где  $\Theta$  – область определения параметра  $\theta$ .

Большинство ошибок применения совершается при проверке сложных, когда оценивание параметров и проверка гипотезы опираются на одну и ту же выборку.

Если процесс вычисления оценки  $\hat{\theta}$  скалярного или векторного параметра закона не опирается на ту же самую выборку, по которой проверяют гипотезу о согласии, то алгоритм применения критерия согласия при проверке сложной гипотезы не отличается от проверки простой гипотезы.

Все непараметрические критерии первоначально строились для проверки простых гипотез. В этой ситуации все непараметрические критерии согласия «свободны от распределения»  $F(x, \theta)$ , относительно которого проверяется гипотеза.

#### IV. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СОГЛАСИЯ

##### Критерий Колмогорова

Критерий Колмогорова опирается на статистику:

$$D_n = \sup_{|x| < \infty} |F_n(x) - F(x, \theta)|$$

где  $F_n(x)$  – эмпирическая функция распределения;  $F(x, \theta)$  – теоретическая функция распределения;  $n$  – объем выборки. При  $n \rightarrow \infty$  функция распределения статистики  $\sqrt{n} \cdot D_n$  сходится равномерно к функции

распределения Колмогорова  $K(s) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k e^{-2k^2 s^2}$ .

В критерии Колмогорова рекомендуется использовать статистику с поправкой Большева в форме

$$S_K = \sqrt{n} D_n + \frac{1}{6\sqrt{n}} = \frac{6n D_n + 1}{6\sqrt{n}} \quad (1)$$

где  $D_n = \max(D_n^+, D_n^-)$ ,  $D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ \frac{i}{n} - F(x_i, \theta) \right\}$ ;

$$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left\{ F(x_i, \theta) - \frac{i-1}{n} \right\},$$

$n$  – объем выборки;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  здесь и далее – упорядоченные по возрастанию выборочные значения;  $F(x, \theta)$  – функция закона распределения, согласие с которым проверяют.

##### Критерий Крамера-Мизеса-Смирнова

Статистика критерия Крамера-Мизеса-Смирнова имеет вид:

$$S_{\omega} = n\omega_n^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left\{ F(x_i, \theta) - \frac{2i-1}{2n} \right\}^2 \quad (2)$$

которая при простой гипотезе в пределе подчиняется закону с функцией распределения  $a1(s)$ , имеющей вид

$$a1(s) = \frac{1}{\sqrt{2s}} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\Gamma(j+1/2)\sqrt{4j+1}}{\Gamma(1/2)\Gamma(j+1)} \exp\left\{-\frac{(4j+1)^2}{16s}\right\} \times \\ \times \left\{ I_{-\frac{1}{4}} \left[ \frac{(4j+1)^2}{16s} \right] - I_{\frac{1}{4}} \left[ \frac{(4j+1)^2}{16s} \right] \right\}$$

где  $I_{-\frac{1}{4}}(\cdot), I_{\frac{1}{4}}(\cdot)$  – модифицированные функции Бесселя вида:

$$I_{\nu}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{z}{2}\right)^{\nu+2k}}{\Gamma(k+1)\Gamma(k+\nu+1)}, |z| < \infty, |\arg z| < \pi$$

##### Критерий Андерсона-Дарлинга

Статистика критерия Андерсона-Дарлинга [7, 8] задается выражением

$$S_{\Omega} = n\Omega_n^2 = \\ = -n - 2 \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{2i-1}{2n} \ln F(x_i, \theta) + \left(1 - \frac{2i-1}{2n}\right) \ln(1 - F(x_i, \theta)) \right\}$$

В пределе при проверке простой гипотезы эта статистика подчиняется закону с функцией распределения  $a2(s)$ , имеющей вид:

$$a2(s) = \frac{\sqrt{2\pi}}{s} \sum_{j=0}^{\infty} (-1)^j \frac{\Gamma(j+1/2)(4j+1)}{\Gamma(1/2)\Gamma(j+1)} \exp\left\{-\frac{(4j+1)^2 \pi^2}{8s}\right\} \times \\ \times \int_0^{\infty} \exp\left\{\frac{s}{8(y^2+1)} - \frac{(4j+1)^2 \pi^2 y^2}{8s}\right\} dy$$

##### Критерий Купера

В критерии Купера статистика  $V_n$  которого определяется соотношением

$$V_n = \sup_{-\infty < x < \infty} \{F_n(x) - F(x, \theta)\} - \inf_{-\infty < x < \infty} \{F_n(x) - F(x, \theta)\}$$

и используется в виде

$$V_n = D_n^+ + D_n^- \quad (4)$$

где  $D_n^+, D_n^-$  (определены выше),  $n$  – объем выборки,  $x_i$  – элементы вариационного ряда.

Статистика  $\sqrt{n}V_n$  подчиняется распределению:

$$G(s|H_0) = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} 2(4m^2 s^2 - 1)e^{-2m^2 s^2}$$

В критерии используется либо модификация статистики:

$$V = V_n \left( \sqrt{n} + 0.155 + \frac{0.24}{\sqrt{n}} \right) \quad (0.20)$$

$$V_n^{mod} = \sqrt{n}(D_n^+ + D_n^-) + \frac{1}{3\sqrt{n}} \quad (0.21)$$

где идея использования поправки вытекает из выражения для статистики критерия согласия Смирнова.

### Критерий Ватсона

Статистика критерия Ватсона имеет вид

$$U_n^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ F_n(x) - F(x, \theta) - \int_{-\infty}^{\infty} (F_n(y) - F(y, \theta)) dF(y, \theta) \right\}^2 dF(x, \theta)$$

и используется в следующей удобной для расчетов форме

$$U_n^2 = \sum_{i=1}^n \left( F(x_i, \theta) - \frac{i - \frac{1}{2}}{n} \right)^2 - n \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F(x_i, \theta) - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{12n} \quad (5)$$

Предельное распределение  $G(U_n^2 | H_0)$  статистики  $U_n^2$  приведено в виде:

$$G(s | H_0) = 1 - 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m-1} e^{-2m^2 \pi^2 s}$$

### Критерии Жанга

В диссертации Жанга и в последующих его работах предложены непараметрические критерии согласия, статистики которых имеют вид:

$$Z_K = \max_{1 \leq i \leq n} \left( \left( i - \frac{1}{2} \right) \log \left\{ \frac{i - \frac{1}{2}}{nF(x_i, \theta)} \right\} + \left( n - i + \frac{1}{2} \right) \log \left\{ \frac{n - i + \frac{1}{2}}{n\{1 - F(x_i, \theta)\}} \right\} \right) \quad (6)$$

$$Z_A = - \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\log \{F(x_i, \theta)\}}{n - i + \frac{1}{2}} + \frac{\log \{1 - F(x_i, \theta)\}}{i - \frac{1}{2}} \right] \quad (7)$$

$$Z_C = \sum_{i=1}^n \left[ \log \left\{ \frac{[F(x_i, \theta)]^{-1} - 1}{\left( n - \frac{1}{2} \right) / \left( i - \frac{3}{4} \right) - 1} \right\} \right]^2 \quad (8)$$

Использование критериев со статистиками (6)–(8) осложняет сильная зависимость распределений статистик от объема выборки  $n$ .

Естественно, зависимость от  $n$  сохраняется и в случае проверки сложных гипотез.

## V. НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ СОГЛАСИЯ ПРИ ПРОВЕРКЕ СЛОЖНЫХ ГИПОТЕЗ

### Факторы, влияющие на распределения статистик критериев при проверке сложных гипотез

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, распределения статистик непараметрических критериев согласия при проверке сложных гипотез зависят от целого ряда факторов, определяющих «сложность» гипотезы.

На законы распределения  $G(S | H_0)$  статистик критериев влияют следующие факторы:

- вид наблюдаемого закона распределения  $F(x, \theta)$ , соответствующего проверяемой гипотезе  $H_0$ ;
- тип оцениваемого параметра и число оцениваемых параметров;
- в некоторых ситуациях конкретное значение параметра (например, в случае гамма-распределения);
- используемый метод оценивания параметров.

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.

Подробно о решении проблем применения критериев согласия при проверке сложных гипотез (как меняются распределения статистик, о построенных моделях этих распределений, о технологиях построения распределений статистик в интерактивном режиме) можно смотреть в руководстве:



Лемешко Б. Ю. Непараметрические критерии согласия. Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 163 с. DOI: 10.12737/11873(доп. тиражи 2018, 2019)

Предшественниками этого руководства были разработанные нами:

– Р 50.1.037–2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Не-

параметрические критерии. – М.: Изд-во стандартов. 2002. – 64 с.

– Лемешко Б.Ю., Постовалов С.Н. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Методические рекомендации. Часть II. Непараметрические критерии. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 85 с.

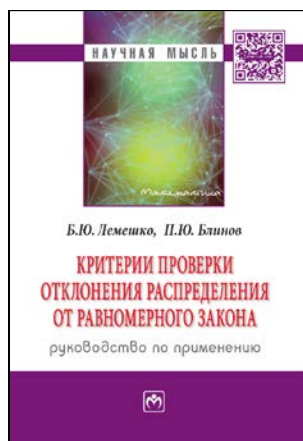
#### VI. О СПЕЦИАЛЬНЫХ КРИТЕРИЯХ ПРОВЕРКИ РАЗЛИЧНЫХ СЛОЖНЫХ ГИПОТЕЗ

Для проверки гипотез о принадлежности выборок наиболее востребованным в приложениях параметрическим моделям законов распределения, таким как нормальный закон, равномерный закон, экспоненциальный закон, предложено множество специальных критериев, ориентированных на проверку сложных гипотез только относительно этого конкретного закона.

Имеется множество критериев, ориентированных на проверку гипотез об однородности законов, об однородности средних (о равенстве математических ожиданий), об однородности дисперсий. Об этих критериях говорилось на «СУДОМЕТРИКЕ-2018».

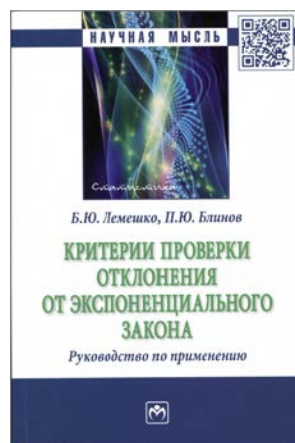
Достаточно представительное множество критериев предложено для проверки гипотез об отсутствии тренда в наблюдаемых рядах измерений.

Все эти критерии имеют свои достоинства и недостатки, обладают различной мощностью относительно разных конкурирующих гипотез. Эти индивидуальные особенности учтены в соответствующих руководствах, разработанных по результатам исследования критериев, и эти знания следует учитывать при применении критериев.



Лемешко Б. Ю., Блинов П. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 183 с. – (Научная мысль). DOI: 10.12737/11304 (доп. тиражи 2016, 2020, 2022)

Показаны достоинства и недостатки 17 специальных критериев, ориентированных только на проверку равномерности (в ISW их около 25), а также применение для проверки равномерности непараметрических критериев согласия и критериев типа хи-квадрат. Приводятся результаты сравнительного анализа критериев.



Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю. Критерии проверки отклонения от экспоненциального закона. Руководство по применению : Монография. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 352 с. – (Научная мысль). – DOI 10.12737/1097477

В руководстве рассматриваются вопросы применения статистических критериев, ориентированных на проверку гипотезы о принадлежности анализируемой выборки экспоненциальному (показательному) закону распределения. В совокупности рассмотрено около 50 критериев. Указываются недостатки и преимущества различных критериев.

Приводятся оценки мощности критериев и результаты сравнительного анализа критериев, а также таблицы, содержащие процентные точки и модели распределений статистик, необходимые для применения критериев.

Рассматривается влияние ошибок округления на распределения статистик и на результаты статистических выводов.



Лемешко Б.Ю., Веретельникова И.В. Критерии проверки гипотез о случайности и отсутствии тренда. Руководство по применению: Монография. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 221 с. – (Научная мысль). DOI 10.12737/1587437

Рассматриваются вопросы применения статистических критериев, ориентированных на проверку гипотез об отсутствии тренда в анализируемых выборках. Неотклонение такой гипотезы даёт основание рассматривать анализируемые данные как выборки независимых одинаково распределённых случайных величин.

Рассматривается множество специальных критериев, ориентированных на проверку такого рода гипотез, а также множество критериев однородности законов, однородности средних и однородности дисперсий, которые также могут применяться в указанных целях. Подчеркиваются недостатки и преимущества различных критериев, рассматривается применение критериев в условиях нарушения стандартных предположений (в том числе в условиях влияния на выводы ошибок округления). Приводятся оценки мощности критериев, что позволяет ориентироваться при выборе наиболее предпочтительных критериев.



**Лемешко Б. Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению: Моно-графия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 248 с. (Научная мысль) DOI: 10.12737/986695 (первое издание – 2017, 2018)**

Рассмотрено применение двухвыборочных критериев однородности законов распределения Смирнова, Леманга–Розенблатта, Андерсона–Дарлингга–Петита,  $k$ -выборочного критерия Андерсона–Дарлингга. Для последнего приводятся модели предельных распределений статистики для различных  $k$ . Рассмотрено применение 3-х критериев однородности Жанга и предложены новые  $k$ -выборочные критерии на основе двухвыборочных с построенными моделями предельных распределений статистик.

Приведены результаты сравнительного анализа 9 параметрических и непараметрических критериев однородности средних, результаты сравнительного анализа более 20 параметрических и непараметрических критериев однородности дисперсий. В ISW реализуется корректное применение параметрических критериев в условиях нарушения стандартного предположения о нормальности.



**Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Руководство по применению: Монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ИНФРА-М, 2023. – 353 с. – (Научная мысль). DOI 10.12737/1896110**

(первое издание – 2015, 2018, 2019, 2021)

Рассматриваются вопросы применения статистических критериев, ориентированных на проверку гипотезы о принадлежности анализируемых данных нормальному закону распределения вероятностей. Рассматриваются и сравниваются специальные критерии, непараметрические критерии согласия и критерии типа  $\chi^2$ . Указываются недостатки и преимущества различных критериев. Приводятся таблицы, процентных точек и модели распределений статистик, необходимые для корректного применения критериев.

По сравнению с первым изданием расширено множество рассмотренных критериев. Критерии проанжированы (в совокупности 50 критериев) по мощности относительно близких конкурирующих гипотез.

Ранжирование облегчает выбор предпочтительных критериев.

Показано, что вследствие наличия ошибок округления свойства критериев в приложениях могут существенно изменяться, и это необходимо учитывать при формировании статистических выводов.

## VII. РАНЖИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА КРИТЕРИЕВ НОРМАЛЬНОСТИ ПО МОЩНОСТИ

В качестве конкурирующих гипотез при исследовании мощности критериев рассматривалась принадлежность следующим законам:

$H_1$  – обобщённому нормальному закону с плотно-

$$\text{стью } f(x) = \frac{\theta_2}{2\theta_1\Gamma(1/\theta_2)} \exp\left\{-\left(\frac{|x-\theta_0|}{\theta_1}\right)^{\theta_2}\right\} \text{ при } \theta_2 = 4;$$

$H_2$  – Лапласа с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{2\theta_1} \exp\{-|x-\theta_0|/\theta_1\};$$

$H_3$  – логистическому с плотностью

$$f(x) = \frac{\pi}{\theta_1\sqrt{3}} \exp\left\{-\frac{\pi(x-\theta_0)}{\theta_1\sqrt{3}}\right\} / \left[1 + \exp\left\{-\frac{\pi(x-\theta_0)}{\theta_1\sqrt{3}}\right\}\right]^2$$

(очень близкому к нормальному закону);

$H_4$  – минимального значения с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\theta_1} \exp\left\{\frac{x-\theta_0}{\theta_1} - \exp\left(\frac{x-\theta_0}{\theta_1}\right)\right\}, \text{ при } \theta_0 = 0.38, \theta_1 = 0.8;$$

$H_5$  – максимального значения с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\theta_1} \exp\left\{-\frac{x-\theta_0}{\theta_1} - \exp\left(-\frac{x-\theta_0}{\theta_1}\right)\right\} \text{ и } \theta_0 = -0.38, \theta_1 = 0.8.$$

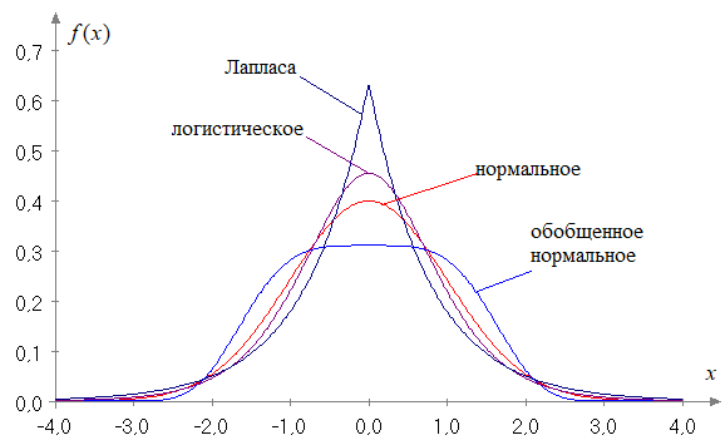


Рис. 6 – Плотности законов распределения, соответствующие рассматриваемым гипотезам  $H_0, H_1, H_2, H_3$

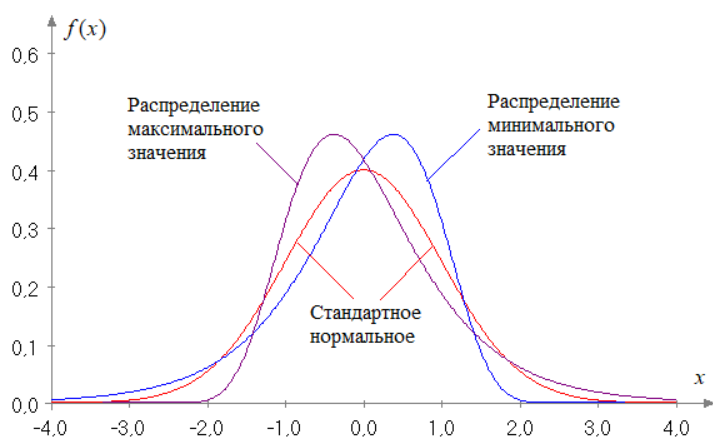


Рис. 7 – Плотности распределений, соответствующие гипотезам  $H_0, H_4, H_5$

По мощности, проявленной относительно каждой конкурирующей гипотезы, множество критериев, применяемых для проверки нормальности, **упорядочивается различным образом.**

В такой ситуации для ранжирования критериев можно поступить следующим образом.

ТАБЛИЦА 1 - РАНЖИРОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ НОРМАЛЬНОСТИ

№	Критерий	Мощность относительно $H_i$				Место относительно $H_i$				$\Sigma$ мест	R
		$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$		
1	Десгань–Мишо $X_{APD}$	0.304	0.705	0.318	0.744	14	7.5	13	16.5	51	1
2	Заманзаде–Аргами $TZ_1$	0.293	0.695	0.330	0.717	16.5	11	12	20	59.5	2
3	Десгань–Мишо $X_{EPD}$	0.451	0.705	0.299	0.356	1	7.5	15	43	66.5	3
4	Бонтемпеа–Меддахи $BM_{3\_6}$	0.216	0.689	0.342	0.744	31	15	8	16.5	70.5	4
5	Д’Агостино $E_p$	0.164	0.671	0.347	0.756	36	18	6	12.5	72.5	5
6	Шапиро–Франция	0.139	0.691	0.333	0.760	39.5	13.5	10.5	9.5	73	7.5
7	Вайсберга–Бингема	0.139	0.691	0.333	0.760	39.5	13.5	10.5	9.5	73	7.5
8	Хегази–Грина $T_2$	0.061	0.723	0.359	0.735	47	5	3	18	73	7.5
9	Заманзаде–Аргами $TZ_2$	0.086	0.752	0.366	0.696	43	3	2	25	73	7.5
10	Ройстона	0.280	0.616	0.273	0.776	21	29	18.5	5.5	74	10
11	Филлибена	0.119	0.699	0.340	0.754	42	10	9	14	75	11
12	Чена–Шапиро	0.327	0.576	0.251	0.776	12	32	26	5.5	75.5	12
13	Гелы–Гаствирга	0.004	0.753	0.378	0.699	49	2	1	24	76	13
14	Гаствирга	0.384	0.731	0.273	0.354	11	4	18.5	44	77.5	14
15	Жанга $Z_C$	0.300	0.548	0.270	0.772	15	34	23	7	79	15
16	Гири	0.394	0.722	0.272	0.271	8.5	6.5	21	46	82	16
17	Харке–Бера	0.071	0.654	0.349	0.756	45	21	4.5	12.5	83	17.5
18	Бонетта–Сейер	0.394	0.722	0.272	0.271	8.5	6.5	21	47	83	17.5
19	Бонтемпеа–Меддахи $BM_{3\_4}$	0.066	0.653	0.349	0.757	46	22	4.5	11	83.5	19
20	Жанга $Z_A$	0.239	0.578	0.272	0.787	29	31	21	3	84	20
21	Шпигельхальтера	0.211	0.790	0.343	0.320	32	1	7	45	85	21
22	Оя $\tilde{T}_{12}$	0.406	0.694	0.228	0.455	6	12	32	38.5	88.5	22
23	Хегази–Грина $T_1$	0.218	0.674	0.267	0.724	30	17	24	19	90	23

В убывающем ряду оценок мощности относительно рассматриваемой гипотезы находится ранг этого критерия. В качестве основы для рейтинга можно взять сумму рангов соответствующего критерия: сумму мест “занятых” критерием по величине мощности относительно  $H_i, i = \overline{1,4}$ . (относительно  $H_4$  и  $H_5$  критерии, как правило, демонстрируют одинаковую мощность). При упорядочивании критериев по возрастанию суммы, порядковые номера (ранги) этих сумм указывают рейтинг соответствующего критерия. При одинаковой сумме мест будут одинаковыми и рейтинги.

На результаты анализа и ранжирование (оценки рейтинга), предложенное в руководстве по критериям нормальности, можно ориентироваться в приложениях, отдавая предпочтение применению того или иного критерия для проверки гипотезы о принадлежности анализируемой выборки нормальному закону.

Результаты ранжирования приведены в таблице 1. Вид статистик рассмотренных критериев, положительные и отрицательные, связанные с их свойствами, отражены в руководстве.



ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 1.

24	Эпса–Пулли	0.275	0.623	0.249	0.751	23.5	26.5	27.5	15	92.5	24
25	Мартинеса–Иглевича	0.252	0.683	0.301	0.503	27	16	14	36	93	25
26	Шапиро–Уилка	0.389	0.502	0.203	0.765	10	38	39	8	95	26
27	Али–Чорго–Ревеса	0.281	0.643	0.240	0.702	20	23	30	22.5	95.5	27.5
28	Андерсона–Дарлинга	0.287	0.630	0.230	0.702	18	24	31	22.5	95.5	27.5
29	Десгань–Мишо $R_n$	0.275	0.670	0.287	0.398	23.5	19	17	42	101.5	29
30	Фросини	0.285	0.623	0.212	0.665	19	26.5	35	27	107.5	30
31	Ван Эса	0.150	0.667	0.298	0.551	38	20	16	34	108	31
32	Ватсона	0.293	0.626	0.204	0.583	16.5	25	38	32	111.5	32
33	Д’Агостино $Z_2$	0.428	0.489	0.241	0.402	5	40	29	41	115	33
34	Крамера–Мизеса–Смирнова	0.269	0.621	0.209	0.652	25	28	37	28	118	34
35	Жанга $Z_K$	0.186	0.569	0.249	0.679	34	33	27.5	26	120.5	35
36	Дэвида–Хартли–Пирсона	0.400	0.499	0.255	0.172	7	39	25	50	121	36
37	Васичека	0.434	0.397	0.137	0.611	3.5	43.5	46.5	29.5	123	37.5
38	Эбрахими	0.434	0.396	0.136	0.611	3.5	43.5	46.5	29.5	123	37.5
39	Локка–Сперриера $T_{2n}$	0.000	0.504	0.222	0.786	50	37	33	4	124	39
40	Оя $\tilde{T}_{34}$	0.262	0.518	0.172	0.715	26	36	43	21	126	40.5
41	Корреа	0.441	0.382	0.132	0.586	2	45	48	31	126	40.5
42	Купера	0.279	0.589	0.192	0.526	22	30	40	35	127	42
43	Лина–Мудхолкара	0.056	0.332	0.216	0.827	48	47	34	1	130	43
44	Хи-квадрат Пирсона	0.311	0.423	0.155	0.455	13	42	45	38.5	138.5	44
45	Локка–Сперриера $T_{1n}$	0.074	0.255	0.168	0.808	44	49	44	2	139	45
46	Колмогорова	0.208	0.540	0.181	0.564	33	35	42	33	143	46
47	Никулина–Рао–Робсона	0.240	0.473	0.188	0.431	28	41	41	40	150	47
48	Жанга	0.179	0.355	0.212	0.476	35	46	36	37	154	48
49	Чена	0.139	0.292	0.130	0.262	41	48	49	48	186	49.5
50	Брис–Хьюберт–Стройфа	0.162	0.147	0.100	0.247	37	50	50	49	186	49.5

### VIII. РАНЖИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА КРИТЕРИЕВ НОРМАЛЬНОСТИ ПО МОЩНОСТИ

В 2002 г. был введен в действие ГОСТ Р ИСО 5479–2002, посвященный проверке отклонения распределения вероятностей от нормального закона. В марте 2020 года ГОСТ был переиздан.

По существу, стандарт предусматривает применение только 2-х критериев нормальности: Шапиро–Уилка и Эпса–Пулли (не свободных от недостатков). Не предусматривается ни использование непараметрических критериев согласия, ни критериев типа  $\chi^2$ . То, что связано с проверкой симметричности и значением эксцесса, не является проверкой нормальности. Модификация критерия Шапиро–Уилка для анализа совокупности малых выборок грешит тем, что распределение её статистики плохо описывается заявленным стандартным нормальным законом.

Если обратиться к результатам ранжирования множества критериев нормальности в нашем руководстве, то можно увидеть, что по предпочтительности критерий Эпса–Пулли находится только на 24-м месте, а Шапи-

ро–Уилка – на 26-м в ряду из 50 критериев. При малых объёмах выборок из-за смещённости эти критерии не способны отличать от нормального закона некоторые близкие конкурирующие законы (в частности, гипотезу  $H_1$ ).

«Оправдывает» существование этого стандарта лишь тот факт, что его текст представляет собой аутентичный перевод ISO 5479: 1997.

### IX. О ПРИМЕНЕНИИ КРИТЕРИЕВ СОГЛАСИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА БОЛЬШИХ ВЫБОРОК

В приложениях всё чаще приходится сталкиваться с необходимостью анализа гигантских объёмов накапливаемых данных (Big Data). Естественно, для анализа применяют различные статистические методы, в том числе критерии проверки статистических гипотез и, в частности, критерии согласия. И здесь обнаруживается, что в случае “больших выборок” критерии “всегда отклоняют” проверяемую гипотезу.

Одновременно можно слышать заявления, что никаких проблем с применением статистических критериев для анализа больших выборок нет.

Проблемы, конечно же, есть, но они решаемы. Объёмы выборок, с которыми имеют дело в Big Data, принадлежащие некоторому непрерывному закону распределения, бывают практически неограничены. Но сами данные в них бывают представлены с ограниченной точностью (округлены с некоторым  $\Delta$ ). По сути, “нарушается предположение” о том, что наблюдается непрерывная случайная величина.

Статистики различных критериев согласия соответствующим образом измеряют отклонение эмпирического распределения  $F_n(x)$  от теоретического  $F(x)$ . При наличии ошибок округления  $\Delta$  с ростом  $n$  в выборках появляются повторяющиеся наблюдения. И, начиная с некоторого  $n$ , ступеньки  $F_n(x)$  и расстояния  $\max |F_n(x) - F(x)|$  перестают уменьшаться. А значения статистик критериев растут. Например, в критерии Колмогорова статистика имеет вид  $S_K = \sqrt{n} \max |F_n(x) - F(x)|$ .

Чтобы использовать классические результаты, рекомендуется применять критерий не ко всему массиву Big Data, а извлекать для анализа из этого массива выборки объёмов  $n < n_{\max}$ , при которых реальное распределение статистики критерия  $G(S_n(\Delta)|H_0)$  ещё не отличается от асимптотического  $G(S|H_0)$ .

**Х. О ВЛИЯНИИ ОШИБОК ОКРУГЛЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИСТИК КРИТЕРИЕВ ПРИ АНАЛИЗЕ “ВЫСОКОТОЧНЫХ” ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОВОДИМЫХ НА ПРЕДЕЛЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ**

Имеются в виду ситуации, когда ошибки округления  $\Delta$  соизмеримы с ошибками измерения ( $\Delta \approx \sigma$ , где  $\sigma$  среднее квадратичное отклонение ошибки измерения). При этом не важно, насколько уникальна измерительная система, и какие сверхточные измерения она обеспечивает. В выборках, соответствующих таким измерениям, как правило, присутствуют повторяющиеся значения.

Следует отметить, что есть целый ряд критериев (нормальности, равномерности, экспоненциальности), например, совокупность критериев, в статистиках которых использованы оценки энтропии, для которых присутствие в выборке даже пары одинаковых значений является основанием для отклонения проверяемой гипотезы (в выборке непрерывной случайной величины не могут присутствовать одинаковые значения). Далее речь будет идти не о таких критериях.

Ниже покажем, как под влиянием ошибок округления меняются распределения статистик критериев согласия, распределения статистик специальных критериев нормальности, экспоненциальности и других критериев.

Все приведенные ниже примеры говорят об одном: при соизмеримости  $\Delta$  и  $\sigma$  нельзя пренебрегать фактом изменения распределений статистик критериев, так как в противном случае, как правило, возрастает вероятность ошибки 1-го рода  $\alpha$  (отклонения справедливой гипотезы

зы  $H_0$ ), или реже – возрастает вероятность ошибки 2-го рода  $\beta$  (в случае двусторонних критериев).

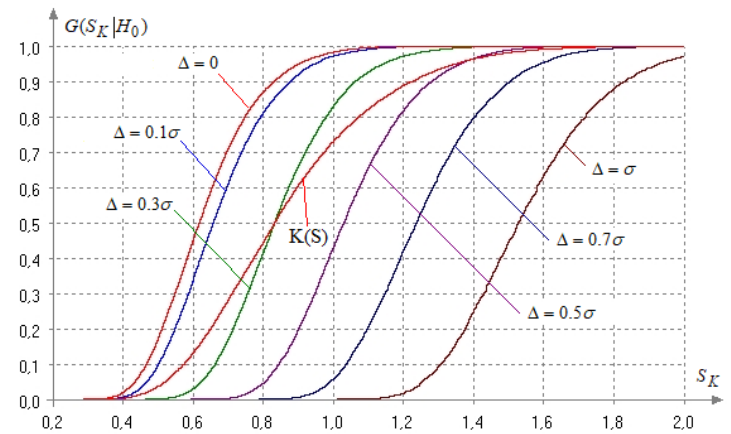


Рис. 8 – Зависимость распределения статистики критерия Колмогорова от  $\Delta$  при справедливости сложной гипотезы  $H_0$  о принадлежности выборки нормальному закону (в случае ОМП) при  $n = 50$

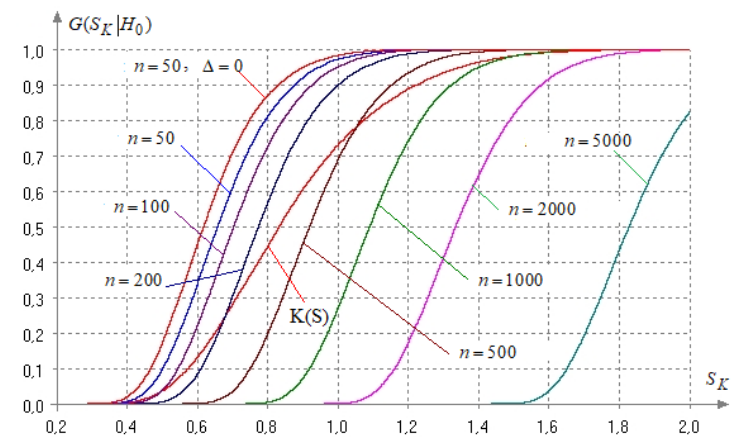


Рис. 9 – Зависимость распределения статистики критерия Колмогорова от  $n$  при справедливости сложной гипотезы  $H_0$  о принадлежности выборки нормальному закону (в случае ОМП) при  $\Delta = 0.1\sigma$

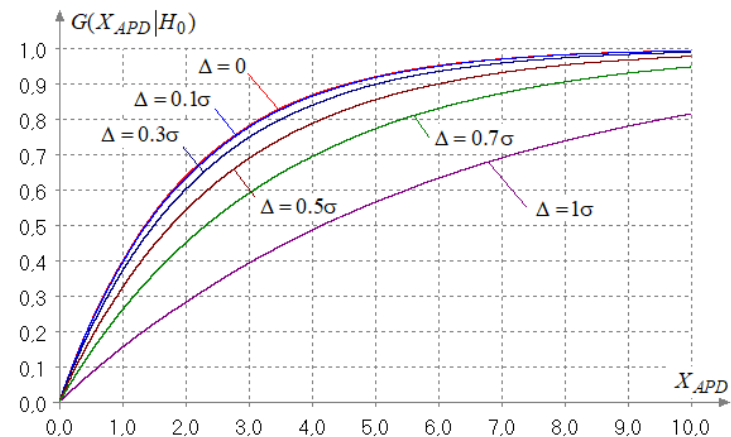


Рис. 9 – Зависимость от  $\Delta$  распределения статистики  $X_{APD}$  критерия нормальности Дегань–Мишо при справедливости  $H_0$  и  $n = 50$

**Этот критерий занимает первую позицию в рейтинге 50-и критериев нормальности.**

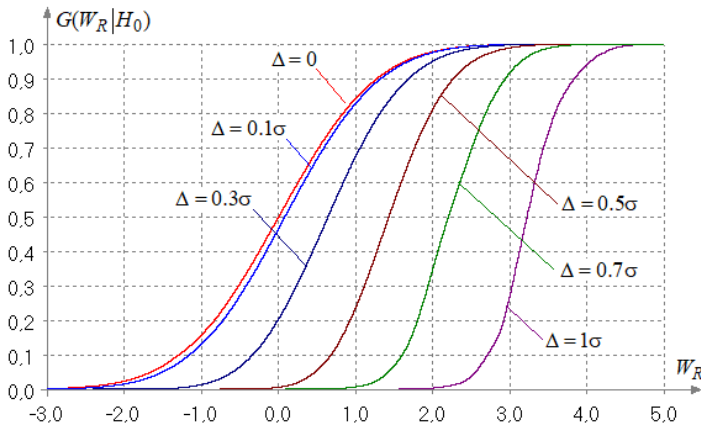


Рис. 10 – Зависимость от  $\Delta$  распределения статистики  $W_R$  критерия нормальности Ройсона при справедливости  $H_0$  и  $n = 50$

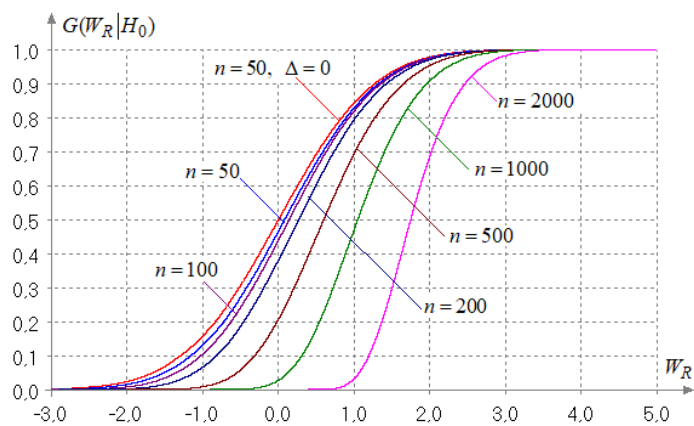


Рис. 11 – Зависимость распределения статистики  $W_R$  критерия нормальности Ройсона от  $n$  при справедливости  $H_0$  и  $\Delta = 0.1\sigma$

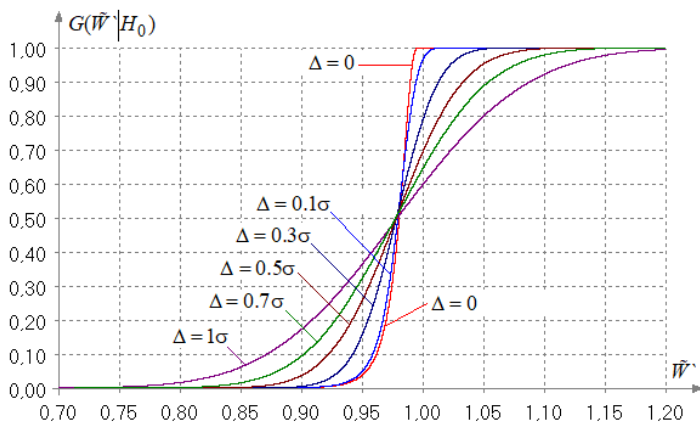


Рис. 11 – Зависимость от  $\Delta$  распределения статистики  $\tilde{W}$  критерия нормальности Вайсберга–Биргема при справедливости  $H_0$  и  $n = 50$

В случае правосторонних и левосторонних критериев пренебрежение фактом изменения распределений статистик вследствие влияния ошибок округления, как правило, приводит к занижению оценки  $p_{value}$  и росту вероятности ошибки 1-го рода.

В случае двусторонних критериев поведение распределений  $G(S_n|H_0)$  статистик под влиянием  $\Delta$  менее предсказуемо: использование классических результатов,

не учитывающих влияния  $\Delta$ , может приводить как к занижению, так и к завышению оценок  $p_{value}$ .

В качестве примера продемонстрируем изменение распределений  $G(d|H_0)$  статистики двустороннего критерия Гири в зависимости от  $\Delta$  при объёме выборок  $n = 50$  (см. рис. 12).

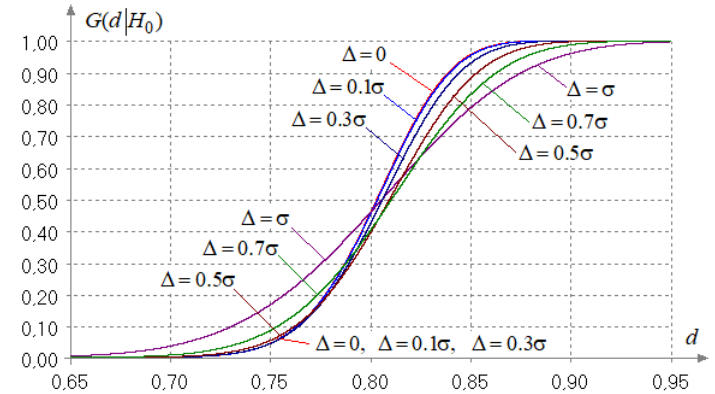


Рис. 12 – Зависимость от  $\Delta$  распределения статистики  $d$  критерия Гири при справедливости гипотезы  $H_0$  о нормальности при  $n = 50$

Значения  $p_{value}$ , получаемые по реальным распределениям статистик, учитывающим влияние  $\Delta$ , в случае двусторонних критериев могут быть как выше, так и ниже их оценок, вычисляемых на основании классических результатов. Это можно увидеть далее в таблицах 3-5, представленных в следующем разделе.

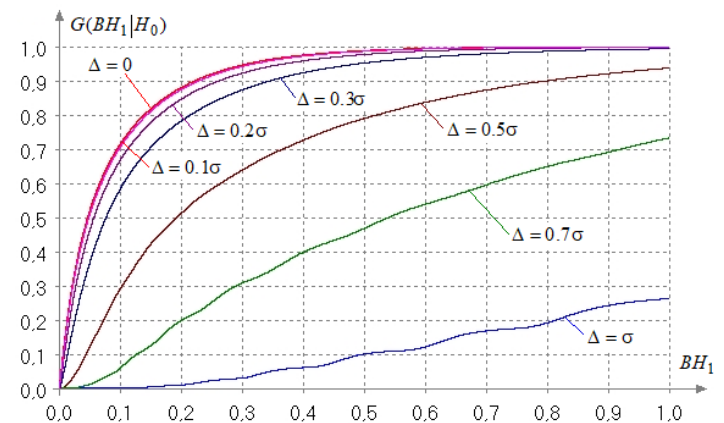


Рис. 13 – Зависимость распределения статистики (2.3) критерия  $BH_1$  Баринхауса–Хензе при проверке экспоненциальности в зависимости от ошибки округления  $\Delta$  при  $n = 50$

Все приведенные выше примеры говорят об одном: при соизмеримости  $\Delta$  и  $\sigma$  нельзя пренебрегать фактом изменения распределений статистик критериев, так как в противном случае, как правило, возрастает вероятность ошибки 1-го рода  $\alpha$  (отклонения справедливой гипотезы  $H_0$ ), или реже – возрастает вероятность ошибки 2-го рода  $\beta$ .

Решать проблему применения критериев проверки различных гипотез в условиях влияния ошибок округления можно единственным способом, разрабатывая программное обеспечение, позволяющее методами статистического моделирования исследовать распределения

статистик критериев (или находить оценки  $p_{value}$ ) в конкретных условиях приложения и при конкретном значении  $\Delta$ .

Таким примером является система ISW, в рамках которой проведены настоящие исследования.

Покажем, как отражается наличие ошибок округления в хорошо известных рядах измерений на результатах проверки принадлежности нормальному закону.

#### XI. ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ НОРМАЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ОКРУГЛЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

В работе Р. Фишера результаты измерений характеристик ирисов были использованы для решения задачи

таксономии. В нашем случае рассмотрим, насколько хорошо эти измерения описываются нормальными законами распределения.

Результаты измерений в сантиметрах представлены в таблице 2.

В таблице для каждого из 3-х видов ириса (*Iris setosa*, *Iris versicolor*, *Iris virginica*) представлены измерения 4-х характеристик для 50 представителей каждого вида:  $S_l$  – Sepal length – длина чашелистика,  $S_w$  – Sepal width – ширина чашелистика,  $P_l$  – Petal length – длина лепестка,  $P_w$  – Petal width – ширина лепестка. Погрешность округления  $\Delta=0.1$  одна и та же для всех измерений.

ТАБЛИЦА 2 - РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ИРИСОВ

№	Iris setosa				Iris versicolor				Iris virginica			
	$S_l$	$S_w$	$P_l$	$P_w$	$S_l$	$S_w$	$P_l$	$P_w$	$S_l$	$S_w$	$P_l$	$P_w$
1	5.1	3.5	1.4	0.2	7.0	3.2	4.7	1.4	6.3	2.2	6.0	2.5
2	4.9	3.0	1.4	0.2	6.4	3.2	4.5	1.5	5.8	2.5	5.1	1.9
3	4.7	3.2	1.3	0.2	6.9	3.1	4.9	1.5	7.1	2.5	5.9	2.1
4	4.6	3.1	1.5	0.2	5.5	2.3	4.0	1.3	6.3	2.5	5.6	1.8
5	5.0	3.6	1.4	0.2	6.5	2.8	4.6	1.5	6.5	2.5	5.8	2.2
6	5.4	3.9	1.7	0.4	5.7	2.8	4.5	1.3	7.6	2.6	6.6	2.1
7	4.6	3.4	1.4	0.3	6.3	3.3	4.7	1.6	4.9	2.6	4.5	1.7
8	5.0	3.4	1.5	0.2	4.9	2.4	3.3	1.0	7.3	2.7	6.3	1.8
9	4.4	2.9	1.4	0.2	6.6	2.9	4.6	1.3	6.7	2.7	5.8	1.8
10	4.9	3.1	1.5	0.1	5.2	2.7	3.9	1.4	7.2	2.7	6.1	2.5
11	5.4	3.7	1.5	0.2	5.0	2.0	3.5	1.0	6.5	2.7	5.1	2.0
12	4.8	3.4	1.6	0.2	5.9	3.0	4.2	1.5	6.4	2.8	5.3	1.9
13	4.8	3.0	1.4	0.1	6.0	2.2	4.0	1.0	6.8	2.8	5.5	2.1
14	4.3	3.0	1.1	0.1	6.1	2.9	4.7	1.4	5.7	2.8	5.0	2.0
15	5.8	4.0	1.2	0.2	5.6	2.9	3.6	1.3	5.8	2.8	5.1	2.4
16	5.7	4.4	1.5	0.4	6.7	3.1	4.4	1.4	6.4	2.8	5.3	2.3
17	5.4	3.9	1.3	0.4	5.6	3.0	4.5	1.5	6.5	2.8	5.5	1.8
18	5.1	3.5	1.4	0.3	5.8	2.7	4.1	1.0	7.7	2.8	6.7	2.2
19	5.7	3.8	1.7	0.3	6.2	2.2	4.5	1.5	7.7	2.8	6.9	2.3
20	5.1	3.8	1.5	0.3	5.6	2.5	3.9	1.1	6.0	2.9	5.0	1.5
21	5.4	3.4	1.7	0.2	5.9	3.2	4.8	1.8	6.9	2.9	5.7	2.3
22	5.1	3.7	1.5	0.4	6.1	2.8	4.0	1.3	5.6	3.0	4.9	2.0
23	4.6	3.6	1.0	0.2	6.3	2.5	4.9	1.5	7.7	3.0	6.7	2.0
24	5.1	3.3	1.7	0.5	6.1	2.8	4.7	1.2	6.3	3.0	4.9	1.8
25	4.8	3.4	1.9	0.2	6.4	2.9	4.3	1.3	6.7	3.0	5.7	2.1
26	5.0	3.0	1.6	0.2	6.6	3.0	4.4	1.4	7.2	3.0	6.0	1.8
27	5.0	3.4	1.6	0.4	6.8	2.8	4.8	1.4	6.2	3.0	4.8	1.8
28	5.2	3.5	1.5	0.2	6.7	3.0	5.0	1.7	6.1	3.0	4.9	1.8
29	5.2	3.4	1.4	0.2	6.0	2.9	4.5	1.5	6.4	3.0	5.6	2.1
30	4.7	3.2	1.6	0.2	5.7	2.6	3.5	1.0	7.2	3.0	5.8	1.6
31	4.8	3.1	1.6	0.2	5.5	2.4	3.8	1.1	7.4	3.0	6.1	1.9
32	5.4	3.4	1.5	0.4	5.5	2.4	3.7	1.0	7.9	3.0	6.4	2.0
33	5.2	4.1	1.5	0.1	5.8	2.7	3.9	1.2	6.4	3.0	5.6	2.2
34	5.5	4.2	1.4	0.2	6.0	2.7	5.1	1.6	6.3	3.1	5.1	1.5
35	4.9	3.1	1.5	0.2	5.4	3.0	4.5	1.5	6.1	3.1	5.6	1.4
36	5.0	3.2	1.2	0.2	6.0	3.4	4.5	1.6	7.7	3.1	6.1	2.3
37	5.5	3.5	1.3	0.2	6.7	3.1	4.7	1.5	6.3	3.1	5.6	2.4
38	4.9	3.6	1.4	0.1	6.3	2.3	4.4	1.3	6.4	3.2	5.5	1.8
39	4.4	3.0	1.3	0.2	5.6	3.0	4.1	1.3	6.0	3.2	4.8	1.8
40	5.1	3.4	1.5	0.2	5.5	2.5	4.0	1.3	6.9	3.2	5.4	2.1
41	5.0	3.5	1.3	0.3	5.5	2.6	4.4	1.2	6.7	3.2	5.6	2.4

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ 2

42	4.5	2.3	1.3	0.3	6.1	3.0	4.6	1.4	6.9	3.2	5.1	2.3
43	4.4	3.2	1.3	0.2	5.8	2.6	4.0	1.2	5.8	3.3	5.1	1.9
44	5.0	3.5	1.6	0.6	5.0	2.3	3.3	1.0	6.8	3.3	5.9	2.3
45	5.1	3.8	1.9	0.4	5.6	2.7	4.2	1.3	6.7	3.3	5.7	2.5
46	4.8	3.0	1.4	0.3	5.7	3.0	4.2	1.2	6.7	3.4	5.2	2.3
47	5.1	3.8	1.6	0.2	5.7	2.9	4.2	1.3	6.3	3.4	5.0	1.9
48	4.6	3.2	1.4	0.2	6.2	2.9	4.3	1.3	6.5	3.6	5.2	2.0
49	5.3	3.7	1.5	0.2	5.1	2.5	3.0	1.1	6.2	3.8	5.4	2.3
50	5.0	3.3	1.4	0.2	5.7	2.8	4.1	1.3	5.9	3.8	5.1	1.8

Вследствие естественного округления результатов измерений в столбцах таблицы 2 наблюдаются повторяющиеся значения.

Посмотрим, как это отражается на результатах проверки гипотезы о принадлежности измерений характеристик ирисов нормальному закону. Результаты проверки принадлежности результатов измерений 4-х характеристик для каждого из 3-х видов ириса нормальным законом представлены в таблицах 3-5.

Всего анализировалось 12 выборок. Использовались:

– 8 критериев согласия (Колмогорова (K), Крамера–Мизеса–Смирнова (CMS), Андерсона–Дарлингa (AD), Купера (Ku), Ватсона (W), Жанга ( $Z_A$ ,  $Z_C$  и  $Z_K$ ));

– 6 специальных критериев нормальности (Бонтемпа–Меддахи со статистикой  $BM_{3-6}$  (BM), Десгань–Мишо со статистикой  $X_{APD}$  (DM), Филлибена (Fb), Гирри (Gr), Ройстона (Rn), Вайсберга–Биргема (WB)).

ТАБЛИЦА 3 - ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ О ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОМУ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ IRIS SETOSA

Test	Sepal length			Sepal width			Petal length			Petal width		
	$\mu = 5.006, \sigma = 0.3489$			$\mu = 3.428, \sigma = 0.3753$			$\mu = 1.462, \sigma = 0.1719$			$\mu = 0.246, \sigma = 0.1043$		
	S	Pvalue		S	Pvalue		S	Pvalue		S	Pvalue	
		$\Delta = 0$	$\Delta = 0.1$		$\Delta = 0$	$\Delta = 0.1$		$\Delta = 0$	$\Delta = 0.1$		$\Delta = 0$	$\Delta = 0.1$
K	0.828	0.106	0.479	0.758	0.192	0.614	1.102	0.006	0.521	2.501	0.000	0.000
CMS	0.071	0.269	0.659	0.074	0.248	0.558	0.187	0.009	0.429	0.982	0.000	0.0001
AD	0.414	0.339	0.731	0.484	0.231	0.496	0.999	0.013	0.522	4.747	0.000	0.0001
Ku	1.511	0.047	0.388	1.420	0.086	0.485	2.110	0.000	0.343	4.148	0.000	0.0004
W	0.070	0.229	0.627	0.072	0.217	0.540	0.188	0.004	0.402	0.940	0.000	0.0001
$Z_A$	3.312	0.636	0.828	3.356	0.148	0.220	3.365	0.107	0.520	3.706	0.000	0.001
$Z_C$	5.643	0.518	0.689	6.690	0.376	0.515	8.390	0.216	0.756	41.661	0.0002	0.002
$Z_K$	1.175	0.262	0.630	1.168	0.078	0.249	0.206	0.019	0.610	12.067	0.000	0.000
BM	0.374	0.924	0.928	2.799	0.282	0.288	3.525	0.196	0.221	16.154	0.010	0.020
DM	0.243	0.884	0.893	2.108	0.345	0.370	3.410	0.169	0.299	17.185	0.000	0.022
Fb	0.991	0.543	0.833	0.981	0.110	0.191	0.974	0.033	0.365	0.891	0.000	0.001
Gr	0.776	0.371	0.351	0.766	0.227	0.218	0.765	0.219	0.156	0.791	0.692	0.120
Rn	0.102	0.462	0.735	0.608	0.273	0.461	1.600	0.055	0.611	4.782	0.000	0.0005
WB	0.982	0.537	0.547	0.964	0.119	0.283	0.949	0.035	0.278	0.795	0.000	0.011

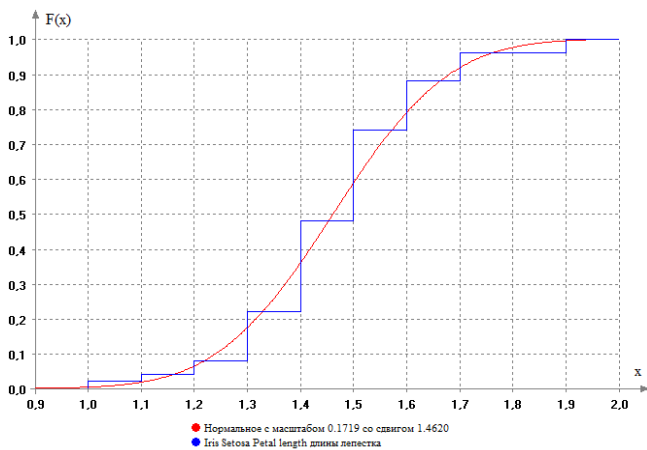


Рис. 14 – Эмпирическое распределение Petal length для Iris setosa и соответствующее нормальное распределение. Если бы мы не учли влияния округлений, то при задании уровня значимости  $\alpha=0.1$  по 9 критериям из 14 гипотеза о нормальности была бы отклонена!

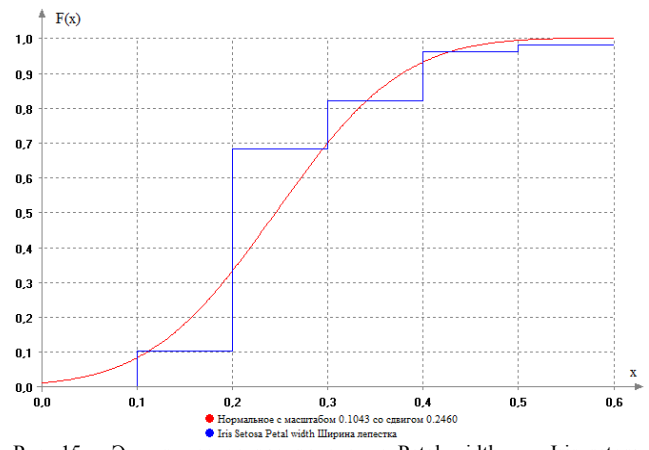


Рис. 15 – Эмпирическое распределение Petal width для Iris setosa и соответствующее нормальное распределение. При задании уровня значимости  $\alpha=0.1$  гипотеза о нормальности не отклоняется только по критерию Гирри!

ТАБЛИЦА 4 – ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ О ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ IRIS VERSICOLOR

Критерий Test	Sepal length			Sepal width			Petal length			Petal width		
	$\mu = 5.936, \sigma = 0.5110$			$\mu = 2.770, \sigma = 0.3106$			$\mu = 4.260, \sigma = 0.4652$			$\mu = 1.3260, \sigma = 0.1958$		
	S	Pvalue		S	Pvalue		S	Pvalue		S	Pvalue	
$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	
K	0.716	0.265	0.557	0.888	0.061	0.415	0.860	0.079	0.259	1.065	0.010	0.453
CMS	0.059	0.395	0.602	0.105	0.094	0.345	0.091	0.147	0.262	0.154	0.023	0.467
AD	0.374	0.421	0.613	0.573	0.139	0.450	0.562	0.149	0.254	0.975	0.015	0.319
Ku	1.282	0.199	0.519	1.403	0.097	0.678	1.252	0.232	0.623	1.886	0.001	0.432
W	0.057	0.362	0.576	0.098	0.093	0.373	0.076	0.191	0.359	0.153	0.014	0.451
Z <sub>A</sub>	3.313	0.624	0.717	3.320	0.500	0.742	3.354	0.155	0.201	3.387	0.050	0.214
Z <sub>C</sub>	6.214	0.441	0.515	5.900	0.483	0.691	8.593	0.203	0.256	12.31	0.055	0.226
Z <sub>K</sub>	0.849	0.520	0.742	1.348	0.176	0.568	1.285	0.204	0.399	2.563	0.008	0.283
BM	1.168	0.639	0.644	2.464	0.333	0.343	4.062	0.151	0.154	0.913	0.721	0.744
DM	0.682	0.708	0.716	2.379	0.302	0.340	3.771	0.150	0.164	0.119	0.942	0.955
Fb	0.992	0.640	0.781	0.988	0.351	0.679	0.984	0.168	0.239	0.976	0.052	0.342
Gr	0.825	0.444	0.482	0.820	0.548	0.658	0.815	0.674	0.726	0.803	0.986	0.786
Rn	0.089	0.468	0.594	0.418	0.340	0.658	1.014	0.156	0.229	1.922	0.027	0.243
WB	0.984	0.620	0.597	0.976	0.346	0.471	0.968	0.166	0.306	0.953	0.047	0.283

ТАБЛИЦА 5 – ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗ О ПРИНАДЛЕЖНОСТИ НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ IRIS VIRGINICA

Критерий Test	Sepal length			Sepal width			Petal length			Petal width		
	$\mu = 6.5880, \sigma = 0.6295$			$\mu = 2.9740, \sigma = 0.3193$			$\mu = 5.552, \sigma = 0.5463$			$\mu = 2.0260, \sigma = 0.2719$		
	S	Pvalue		S	Pvalue		S	Pvalue		S	Pvalue	
$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	$\Delta = 0$		$\Delta = 0.1$	
K	0.841	0.095	0.202	0.925	0.042	0.314	0.843	0.092	0.238	0.895	0.057	0.504
CMS	0.089	0.155	0.210	0.106	0.093	0.313	0.087	0.165	0.250	0.121	0.059	0.308
AD	0.557	0.153	0.204	0.611	0.112	0.355	0.619	0.108	0.159	0.760	0.048	0.245
Ku	1.331	0.151	0.336	1.744	0.008	0.170	1.322	0.159	0.411	1.746	0.008	0.259
W	0.085	0.140	0.198	0.102	0.081	0.308	0.074	0.201	0.322	0.121	0.044	0.273
Z <sub>A</sub>	3.332	0.334	0.377	3.342	0.238	0.389	3.356	0.146	0.175	3.356	0.146	0.296
Z <sub>C</sub>	6.711	0.373	0.420	7.263	0.314	0.486	9.466	0.148	0.178	9.737	0.133	0.275
Z <sub>K</sub>	1.306	0.194	0.296	1.496	0.124	0.439	1.554	0.107	0.201	2.076	0.028	0.230
BM	1.605	0.514	0.517	2.839	0.276	0.285	3.994	0.156	0.157	1.475	0.550	0.560
DM	0.824	0.660	0.667	2.762	0.249	0.283	3.038	0.216	0.228	1.233	0.536	0.579
Fb	0.985	0.220	0.267	0.982	0.116	0.244	0.983	0.137	0.176	0.983	0.147	0.396
Gr	0.798	0.871	0.854	0.759	0.152	0.146	0.805	0.938	0.970	0.839	0.200	0.317
Rn	0.649	0.259	0.316	0.912	0.181	0.389	1.238	0.108	0.144	1.360	0.088	0.268
WB	0.971	0.221	0.324	0.964	0.122	0.309	0.965	0.131	0.240	0.966	0.136	0.350

Для каждой выборки в таблицах приводятся ОМП параметров  $\mu$  и  $\sigma$  нормального закона и вычисленные значения  $S$  статистик применяемых критериев. Значения достигнутого уровня значимости  $p_{value}$  в предположении об отсутствии ошибок округления (при  $\Delta = 0$ ) для критериев Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлингга, Купера, Ватсона, Десгань–Мишо и Ройстона могут быть рассчитаны по известным асимптотическим распределениям статистик. Но распределения статистик остальных критериев зависят от  $n$ . Для чистоты эксперимента оценки  $p_{value}$  в отсутствие ошибок округления (при  $\Delta = 0$ ) находились по распределениям статистик  $G(S_n|H_0)$ , моделируемым при  $n = 50$ .

Оценки  $p_{value}$  в условиях влияния ошибок округления (при  $\Delta = 0.1$  и при соответствующей ОМП для  $\sigma$ ) вычислялись по реальным распределениям  $G(S_n|H_0)$  статистик критериев, моделируемым в интерактивном режиме. Такая возможность реализована в нашей программной системе ISW.

Как можно видеть, оценки  $p_{value}$ , вычисленные по реальным распределениям  $G(S_n|H_0)$  статистик, имеющих место в условиях наличия ошибок округления ( $\Delta = 0.1$ ), кардинально отличаются от значений  $p_{value}$ , вычисленных по распределениям статистик этих же критериев в условиях отсутствия ошибок округления ( $\Delta = 0$ ). И если пренебречь влиянием ошибок округления на распределения ста-

статистик критериев, то во многих случаях гипотеза о нормальности будет несправедливо отклоняться.

В данном случае надо обратить внимание на то, что каждой проверке по каждому применяемому критерию при ( $\Delta = 0.1$  и  $n = 50$ ) соответствует своё распределение статистики  $G(S_n|H_0)$ , зависящее от  $\sigma$  нормального закона. То есть, для анализа 12 выборок по каждому из 14 критериев мы должны использовать 12 различных распределений  $G(S_{50}|H_0)$  статистики применяемого критерия, по которому и вычисляется  $P_{value}$ .

Следует сделать ещё одно важное замечание. Среди специальных критериев нормальности есть правосторонние, левосторонние и двусторонние критерии. Вследствие влияния ошибок округления распределения статистик правосторонних критериев сдвигаются вправо, а левосторонних – влево. При этом реальный достигнутый уровень значимости  $P_{value}$ , учитывающий влияние  $\Delta$ , всегда оказывается не меньше того, что мы имеем при его вычислении без учёта такого влияния. В случае двусторонних критериев вследствие влияния  $\Delta$  область определения статистик критериев также меняется: при этом она может изменяться по масштабу и сдвигаться влево или вправо. Поэтому реальный  $P_{value}$ , учитывающий влияние  $\Delta$ , может возрастать, а может и уменьшаться. Чтобы подчеркнуть этот факт, в строках таблиц 3-5 для двустороннего критерия Гири ситуации с уменьшением  $P_{value}$  из-за влияния  $\Delta$  выделены цветом.

В отсутствие влияния округлений распределения  $G(S_n|H_0)$  статистик критериев Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлинга, Купера, Ватсона, Десгань–Мишо и Ройстона быстро сходятся к асимптотическим  $G(S|H_0)$  распределениям этих статистик: отклонением  $G(S_n|H_0)$  от  $G(S|H_0)$  можно пренебречь, как правило, при  $n \geq 25 \div 30$ . При наличии влияния ошибок округления (как в данном случае) распределения  $G(S_n|H_0)$  могут не сходиться к асимптотическим  $G(S|H_0)$ , а с ростом  $n$  всё дальше отклоняться от них.

Проведенные ранее исследования показали, что и при проверке простых гипотез о принадлежности выборок нормальному закону (в условиях влияния  $\Delta$ ) распределения статистик  $G(S_n|H_0)$  непараметрических критериев согласия (Колмогорова, Крамера–Мизеса–Смирнова, Андерсона–Дарлинга, Купера, Ватсона) становятся зависящими от  $n$ , от  $\Delta$  и от значения параметра масштаба  $\sigma$ , а с ростом  $n$  всё больше отклоняются от асимптотических  $G(S|H_0)$ .

В общем случае проверки сложной гипотезы о принадлежности выборки некоторому закону  $F(x, \theta)$  к факторам, влияющим на распределения статистик  $G(S|H_0)$  при сложной гипотезе, добавляется зависимость от  $n$ ,  $\Delta$  и от значений оценок параметров формы и масштаба закона  $F(x, \theta)$ .

## ХИ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Да, реальные свойства статистических критериев проверки гипотез порой отличаются от заявленных. Да, применение критериев в приложениях зачастую оказывается в условиях нарушения стандартных предположений. Да, естественное присутствие ошибок округления также может приводить к изменению свойств критериев.

Но всё это вместе не исключает возможность корректного применения критериев в нестандартных условиях различных приложений, опираясь на знание реальных свойств критериев и компьютерные технологии. А корректное применение методов статистического анализа способствует принятию обоснованных решений, в том числе в задачах метрологического обеспечения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лемешко Б. Ю. Непараметрические критерии согласия. Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 163 с. DOI: 10.12737/11873.
- [2] Лемешко Б. Ю., Блинов П. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от равномерного закона. Руководство по применению: Монография. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 183 с. – (Научная мысль). DOI: 10.12737/11304.
- [3] Лемешко Б.Ю., Блинов П.Ю. Критерии проверки отклонения от экспоненциального закона. Руководство по применению : Монография. – Москва : ИНФРА-М, 2021. – 352 с. – (Научная мысль). – DOI 10.12737/1097477.
- [4] Лемешко Б.Ю., Веретельникова И.В. Критерии проверки гипотез о случайности и отсутствии тренда. Руководство по применению: Монография. – Москва : ИНФРА-М. 2021. – 221 с. – (Научная мысль). DOI 10.12737/1587437.
- [5] Лемешко Б. Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению: Монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2021. – 248 с. (Научная мысль) DOI: 10.12737/986695.
- [6] Лемешко Б. Ю. Критерии проверки отклонения распределения от нормального закона. Руководство по применению : Монография. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : ИНФРА-М, 2023. – 353 с. – (Научная мысль). DOI 10.12737/1896110.
- [7] Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. Непараметрические критерии согласия при проверке нормальности в условиях округления измерений // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 2 (86). – С. 21-38. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-2-21-38.
- [8] Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. Проблемы применения непараметрических критериев согласия в задачах обработки результатов измерений // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 2 (82). – С. 47-66. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-2-47-66.
- [9] Lemeshko B. Y., Lemeshko S. B. About the effect of rounding on the properties of tests for testing statistical hypotheses // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1715. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012063.
- [10] Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. О влиянии ошибок округления на распределения статистик критериев согласия // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. – № 53. – С. 47-60. DOI: 10.17223/19988605/53/5.
- [11] Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б. Влияние округления на свойства критериев проверки статистических гипотез // Автотметрия. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 35-45. - DOI: 10.15372/AUT20200305.

# Эргодические свойства сигналов и обработка данных при измерениях

Т. Н. Сирая

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metrolog@eprib.ru

**Аннотация** — Рассматриваются вопросы оценивания параметров случайных сигналов, при использовании только одной реализации процесса. Анализируются условия получения состоятельных оценок параметров, включая условия эргодичности сигналов и оценивание систематических погрешностей. Сопоставлены эргодические условия для двух актуальных классов случайных процессов – стационарных и процессов со стационарными приращениями. На основе анализа основных вариантов выявления и оценивания систематических погрешностей показано, что условие эргодичности можно рассматривается как критерий выделения составляющих погрешностей.

**Ключевые слова** — случайный сигнал, реализация, оценка параметра, эргодическое свойство, случайная погрешность, систематическая погрешность

## I. ВВЕДЕНИЕ

На практике при обработке экспериментальных данных при измерениях (оценивании параметров сигнала), как правило, имеется только одна реализация случайного сигнала, по которой необходимо определить искомые оценки параметров.

Для того, чтобы оценки параметров по реализации были состоятельны, то есть, сходились к действительным значениям параметров, случайная функция должна, прежде всего, обладать свойством эргодичности [1–4]. К сожалению, на практике условие эргодичности нередко не проверяют и принимают его по умолчанию, что может в итоге приводить к несоответствиям.

Условия эргодичности достаточно хорошо изучены для стационарных процессов, которые наиболее часто используются на практике [1–4]. Для других классов процессов аналогичные условия мало изучены. В данной работе рассматриваются условия эргодичности для более широкого класса процессов – случайных процессов со стационарными приращениями (далее – СПСП) [5, 6].

Кроме условия эргодичности, для получения состоятельных оценок параметров важно также учитывать и оценивать влияние систематических погрешностей. В докладе проведен анализ основных вариантов выделения и оценивания систематических составляющих. На основе анализа предложено рассматривать условие эргодичности как критерий выделения составляющих погрешностей.

## II. УСЛОВИЯ ЭРГОДИЧНОСТИ ДЛЯ СТАЦИОНАРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Понятие эргодичности сначала появилось в статистической механике, и далее было распространено на случайные процессы [1–4]. Стационарный процесс называют эргодическим, если статистические характеристики, полученные при усреднении по времени (по одной реализации процесса), совпадают с результатами, полученными при усреднении по вероятностному ансамблю [1–3]:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = M(x)$$

Далее рассматривается эргодичность в слабом смысле (то есть, в рамках корреляционной теории); причем для гауссовских процессов это совпадает и со строгой эргодичностью.

Условие эргодичности процесса весьма существенно при оценивании параметров процессов. При нарушении этого условия оценки, полученные по реализации процесса, могут содержать неконтролируемые (неоцениваемые) погрешности, а следовательно, приводить к неверной интерпретации результатов и ошибочным выводам. К сожалению, на практике условия эргодичности не всегда проверяют, хотя иногда они бывают довольно простыми (возможно, поэтому их считают очевидными и принимают по умолчанию).

Условия эргодичности для стационарных процессов [1–4] формулируются через корреляционную функцию стационарного процесса  $R(t)$ :

1) Стационарный процесс с корреляционной функцией  $R(t)$  является эргодическим тогда и только тогда, когда выполнено условие:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T R(t) dt = 0 \quad (1)$$

2) Достаточным для эргодичности стационарного процесса является условие:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} R(t) = 0. \quad (2)$$

Эти условия на практике часто выполняются, поэтому их нередко считают очевидными и принимают без достаточного обоснования. Однако они выполняются не всегда, что может приводить к несоответствиям.



Приведем простые примеры стационарных процессов, которые не являются эргодическими [1, 4].

1) Если  $x(t)$  – эргодический процесс, и  $z$  – постоянная случайная величина, то их сумма

$$y(t) = x(t) + z$$

- не является эргодическим процессом.

Такая ситуация нередко встречается в измерительных задачах. Составляющая  $z$ , постоянная вдоль одной реализации, но изменяющаяся при переходе к другой реализации процесса (от одного пуска к другому), может быть обусловлена, например, погрешностью выставки устройства или систематической составляющей средства измерений. Если при обработке данных и оценивании погрешностей не учитывать второе слагаемое, то полученные оценки погрешностей измерений будут некорректны.

2) Гармоническое колебание со случайными амплитудой  $A$  и сдвигом по фазе  $\varphi$ :

$$X(t) = A \cos(\lambda t + \varphi),$$

где  $\varphi$  имеет равномерное распределение, также представляет собой пример стационарного, но неэргодического процесса.

### III. УСЛОВИЯ ЭРГОДИЧНОСТИ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ СО СТАЦИОНАРНЫМИ ПРИРАЩЕНИЯМИ

Условия эргодичности для нестационарных процессов до сих пор мало изучены. При этом одним из первоочередных вопросов является выбор класса нестационарных процессов и корректная формулировка условия эргодичности, в частности, рациональный выбор характеристик нестационарного процесса, которые следует оценивать по реализации.

Класс случайных процессов со стационарными приращениями (далее – СПСП) представляет интерес по ряду причин [5-7]:

1) Класс СПСП является существенным и актуальным для приложений расширением класса стационарных процессов; в частности, он включает Винеровские процессы и интегралы от стационарных процессов, которые актуальны для многих измерительных задач;

2) СПСП имеют спектральное представление, которое является обобщением спектрального представления стационарных процессов;

3) СПСП также представляют интерес при обосновании вариации Аллана, которая введена и успешно используется как альтернатива классической дисперсии.

Случайный процесс  $X(t)$ ,  $-\infty < t < \infty$ , называется процессом со стационарными приращениями [5], если:

– математические ожидания приращений процесса на интервалах времени пропорциональны длинам интервалов:

$$M(X(s) - X(t)) = a(s - t),$$

– ковариации приращений процесса зависят 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, корреляционные свойства СПСП задаются структурной функцией, которая определяется как дисперсия его приращений:

$$D_0(\tau) = E[X(t+\tau) - X(t)]^2. \quad (3)$$

Этот класс случайных процессов был введен и исследовался в работах А. М. Яглома [5]; в прикладном плане СПСП эффективно используются при анализе сложных физических явлений (в частности, турбулентности) в атмосфере и океане.

Свойства основной характеристики СПСП – структурной функции  $D_0(\tau)$  – существенно отличаются от свойств корреляционной функции  $R(t)$  стационарного процесса. В частности, корреляционная функция  $R(t)$  всегда ограничена:

$$|R(t)| \leq R(0),$$

но структурная функция  $D_0(\tau)$  может быть неограниченной. Например, для Винеровского процесса структурная функция линейна:  $D_0(\tau) = K \cdot \tau$ .

Тем не менее, рост структурной функции все же ограничен квадратичной функцией, то есть, подчиняется условию [5]:

$$D_0(\tau) \leq A \cdot \tau^2.$$

При этом равенство достигается для линейной функции  $X(t) = c_0 + c_1 t$  со случайными коэффициентами, имеющей структурную функцию  $D_0(\tau) = A \cdot \tau^2$ .

Поскольку структурная функция является основной характеристикой СПСП, возникает задача ее оценивания по реализации СПСП. В качестве оценки структурной функции, как показано в [6], можно использовать вариацию Аллана [7], которая определяется как среднее квадратическое значение разностей последовательных значений сигнала, усредненных на заданных интервалах:

$$\sigma_a^2(\tau) = \sum_{k=1}^{n-1} (x_{k+1}(\tau) - x_k(\tau))^2 / 2(n-1), \quad (4)$$

где  $x_k(\tau)$  – среднее значение сигнала  $x(t)$  на интервале  $[t_0 + k\tau, t_0 + (k+1)\tau]$ ,  $k=1, \dots, n$ .

Исходно вариация Аллана была введена [7] как эвристическая оценка, альтернативная классической дисперсии, без формального обоснования и выделения базовой модели.

Вариация Аллана используется в измерительных и навигационных задачах, и оказывается весьма эффективной в тех случаях, когда не могут использоваться классическая дисперсия и спектральные методы. В частности, она применима для обобщенных стационарных процессов (типа белых и  $1/f$  – шумов), а также нестационарных процессов (прежде всего – Винеровских). Однако интерпретация вариации Аллана до сих пор не была связана с моделью СПСП (хотя Винеровский процесс можно считать наиболее типичным представителем класса СПСП).

В данной работе рассматриваются условия эргодичности для класса СПСП, причем эргодичность рассматривается в конкретном (узком) смысле – как возможность оценивать структурную функцию по одной реализации СПСП.

Достаточным условием эргодичности является следующее:

Если структурная функция  $D_0(\tau)$  процесса  $x(t)$  удовлетворяет условию: при любом  $\tau > 0$

$$\lim \{ [D_0(t + \tau) + D_0(t - \tau)]/2 - D_0(t) \} = 0 \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (5)$$

то процесс  $x(t)$  является эргодическим (в смысле оценивания структурной функции).

При этом условии вариация Аллана является состоятельной оценкой структурной функции [6].

Отметим отличия условия (5), которое можно назвать «эргодичностью приращений СПСП», от классического условия эргодичности стационарных процессов (2).

В случае стационарного процесса  $X(t)$  (который также относится к СПСП) условие (5) можно выразить через его корреляционную функцию  $R(t)$ , и тогда оно приводится к виду:

$$2 R(t) - [R(t+\tau) + R(t-\tau)] \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Такое условие, очевидно, несколько слабее, чем классическое условие эргодичности (2) стационарного процесса (относительно его корреляционной функции), которое отмечено выше. По-видимому, с этим связано и то практическое обстоятельство, что иногда для стационарного процесса бывает более рационально оценивать структурную, а не корреляционную функцию, поскольку при этом исключается влияние некоторых составляющих погрешностей [5].

Условие (5) выполняется для многих нестационарных процессов, имеющих неограниченные корреляционные и структурные функции, например для винеровских процессов, имеющих  $D_0(\tau) = K \cdot \tau$ . Однако это условие выполняется не всегда; например, оно нарушено при квадратичной структурной функции вида  $A \cdot \tau^2$  (для отмеченного выше линейного СПСП  $X_I(t) = c_0 + c_1 t$ ). В то же время, корректное применение вариации Аллана (как оценки структурной функции) ограничивается классом эргодических СПСП.

$$y(t) = x(t) + c_0 + c_1 t.$$

Такая ситуация нередко встречается на практике, и следует отметить, что в данном случае было бы необходимо предварительно выделить линейный тренд и затем применить вариацию Аллана к эргодической составляющей.

#### IV. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Выше отмечались типичные случаи нарушения свойств эргодичности процессов, которые, как правило, были связаны с наличием систематических погрешностей (СистП). В соответствии с классическим определением, СистП отражают некоторые регулярные влияния, которые проявляется в рамках определенной совокупности однородных измерений, серии измерений или отдельного измерения [8, 9]. Таким образом, понятие СистП носит относительный и локальный характер, и, следовательно, можно выделить несколько основных

уровней моделей СистП, в соответствии с их видом и локализацией действия.

1 Для постоянных СистП можно выделить следующие уровни:

1а) строго постоянные СистП – априорно неизменные при повторении измерений или для типа средства измерений (СИ):  $\theta = \theta_0$ ;

1б) локально-постоянные СистП – неизменные в рамках:

– однородной серии измерений:  $\theta_{ij} = \theta_j$ ,

– определяемые для конкретного СИ:  $\theta_{ij} = \theta_j$ ,

– определяемые в одном запуске СИ:  $\theta_{ij}$ .

2 Для функциональных СистП могут различаться уровни стабильности параметров:

2а) функциональные СистП – функции известного вида от времени (или аргументов), которые сохраняют параметры при повторении измерений или для типа СИ:

$$\theta(t) = f(\alpha_1, \dots, \alpha_m, t);$$

2б) локально функциональные СистП – функции известного вида от времени (аргументов), которые сохраняют параметры в однородной серии измерений, или для конкретного СИ, или в одном запуске СИ

$$\theta_i(t) = f(\alpha_{1i}, \dots, \alpha_{mi}, t);$$

2в) уточненные функциональные СистП – определяемые в запуске по дополнительной информации (например, при испытаниях)

$$\theta_{ij}(t) = f(\alpha_{1i}, \dots, \alpha_{mi}, \omega_j, t).$$

Уровни локализации СистП определяются областью адекватности и свойствами моделей. При этом на каждом уровне уточняется граница (или соотношение) между случайными и систематическими составляющими.

Следует также отметить, что выявление основных систематических факторов, обуславливающих составляющие СП, может быть основано на различных принципах. В дальнейшем это определяет также проблемы формализации выделенных факторов и формирование моделей СистП.

В качестве примера целесообразно рассмотреть схему формирования составляющих погрешностей применительно к этапам измерительной процедуры, прежде всего – на основе структурной схемы измерительной процедуры [9, 10]. Такой подход приводит к выделению составляющих погрешностей, приведенных в табл. 1.

В табл. 1 также указаны основные причины (или факторы), обуславливающие появление погрешности (П), а также характер составляющих – систематические (СистП) или случайные (СлП).

Разумеется, данный перечень составляющих ориентируется на «типовую» структуру измерительной процедуры [9, 10] и потому может быть неполным (открытым). Для специальных областей приложений или специфических измерительных задач он может быть расширен. Имея в виду необходимость расширения анализа на

область навигационных приложений, его можно будет расширить и в этих аспектах.

ТАБЛИЦА 1. ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ЕГО ЭЛЕМЕНТАМИ

Обозначения	Причины (факторы), обуславливающие погрешности	Наименование составляющей	Характер составляющей
1	2	3	4
ξ1	несовершенство измерительной модели объекта исследований (ОИ)	пороговое несоответствие модели ОИ	СистП
ξ2	использование «вторичных» величин (при косвенных измерениях)		СистП + СлП
ξ3	неточность установки средства измерений (СИ)	установочные П, П горизонтирования	СистП
ξ4	неточность выполнения операций по подготовке СИ к применению		СистП + СлП
ξ5	искажение физической величины ввиду взаимодействия СИ с ОИ		СистП + СлП
ξ6	наличие помех (мешающих воздействий) на входе СИ		СлП
ξ7	несовершенство свойств СИ, несоответствие МХ СИ свойствам СИ	основные погрешности СИ	СистП + СлП
ξ8	реакция СИ на изменения влияющих величин	дополнительные погрешности СИ	СистП + СлП
ξ9	инерционность СИ, скорость изменения входного сигнала СИ	динамические погрешности СИ	СистП + СлП
ξ10	неточность реализации методики (метода) измерений	методические П	СистП
ξ11	помехи на выходе СИ		СлП
ξ12	специфика регистрации сигнала или отсчитывания показаний СИ	П регистрации, отсчитывания	СистП + СлП
ξ13	несовершенство модели экспериментальных данных		СистП + СлП
ξ14	несовершенство алгоритма обработки данных		СистП + СлП
ξ15	неточность реализации алгоритма обработки с помощью программ		СистП + СлП
ξ16	несовершенство процедур передачи и ввода данных		СистП + СлП
ξ17	несовершенство вычислительного устройства		СистП + СлП

Отметим, что после выявления всех СистП, по возможности, вводят поправки на некоторые составляющие и оценивают неисключенные остатки СП (НСП). Поэтому в табл. 1 представлены либо «неисправленные» СистП, либо остатки СистП (НСП).

#### V. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ И ЭРГОДИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Одним из проблемных вопросов современной теории погрешностей является нечеткость и недостаточная формализация определения систематической погрешности [8-10]. Если для СлП имеется вполне понятное определение через случайную модель, то для СистП применяется несколько размытое словесное описание. В то же время, для оценивания СистП обычно приходится использовать рандомизацию и квазистатистические методы [8, 9].

Введение понятия «неопределенности» и выделение неопределенностей групп А и В [11] не проясняет ситуацию, поскольку для каждой из групп используются аналогичные показатели и методы.

Проблемы, связанные с выделением и оцениванием СистП, все же остаются нерешенными, лишь в слегка измененных терминах.

По существу, на каждом этапе анализа погрешности формируется разбиение суммарной погрешности на две составляющие, и одним из основных критериев выделения случайной составляющей является свойство эргодичности

случайной функции, представляющей модель погрешности.

Поэтому в первом приближении можно было бы предложить рабочее определение составляющих:

– случайная погрешность - описываемая эргодической составляющей случайной функции в общей модели погрешности (которая может быть оценена по одной реализации);

– систематическая погрешность – описываемая неэргодической составляющей указанной функции.

Хотя такое разделение является условным и в ряде случаев потребует уточнения, но оно отражает принципиально важный аспект в разделении составляющих. Кроме того, многие СистП можно было бы определить как погрешности неадекватности элементов измерительной процедуры относительно определенных метрологических моделей.

С принципиальной точки зрения такое разделение не вполне корректно, поскольку основано на моделях, используемых при оценивании погрешностей. Однако с практической точки зрения такое разделение во многих случаях может быть полезно.

#### VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведены эргодические условия, позволяющие получать состоятельные оценки параметров по одной реализации, для двух актуальных классов случайных процессов

– стационарных и процессов со стационарными приращениями. Показано, что для более широкого класса такие условия слабее, чем для стационарных процессов.

2. На основе анализа основных вариантов выявления и оценивания систематических погрешностей предложено использовать условие эргодичности как критерий разделения случайных и систематических составляющих погрешностей.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [12] Крамер Г., Лидбеттер М. Стационарные случайные процессы. – Изд-во «Мир», М., 1969.
- [13] Свешников А. А. Прикладные методы теории случайных функций – М.: «Наука», Гл. ред. физ.-матем. лит., 1968. – 464 с.
- [14] Яглом А. М. Корреляционная теория стационарных случайных функций. – Л.: Гидрометеиздат, 1981.
- [15] Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных – М.: Мир, 1989. – 540 с.
- [16] Yaglom A. M. Correlation Theory of Stationary and Related Random Functions. – Vol. 1, Vol. 2. – Springer-Verlag, New York, 1987.
- [17] Сиряя Т. Н. Статистическая интерпретация вариации Аллана как характеристики измерительных и навигационных систем – Гироскопия и навигация, 2020, т. 28, № 1. С. 3-18.
- [18] Аллан Д. У. Вариации Аллана: история создания, преимущества и недостатки, основные области применения. – Гироскопия и навигация, № 4 (91), 2015. С. 3 – 20.
- [19] Рабинович С. Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 262 с.
- [20] Грановский В. А., Сиряя Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
- [21] Сиряя Т. Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели. – Измерительная техника, 2018, № 1. С. 3 – 12.
- [22] Руководство по выражению неопределенности измерения: Пер. с англ. – СПб: ГП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», 1999.

**Abstract** — Topical issues related to ergodic property of random signals are considered. The ergodic theorems for stationary process and process with stationary increments are compared. Systematic errors are considered as non-ergodic components of measurement errors.

**Key words** — random signal, implementation, parameter estimation, ergodic property, random error, systematic error.

# Стандартизация бесплатформенных инерциальных навигационных систем морского применения: первые результаты

В. В. Беляева

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metrolog@eprib.ru

В.А. Грановский

ФГАОУ ВО «ГУАП»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: valgr39@mail.ru

**Аннотация** — Указаны предпосылки упорядочения области контроля качества бесплатформенных инерциальных навигационных систем морского применения. Показаны решения, выбранные для реализации поставленной задачи. Приведены результаты работы Проектного технического комитета 709 (ПТК 709 Росстандарта) по разработке первого национального стандарта в данной области. Представлены направления дальнейших работ.

**Ключевые слова** — стандартизация, система, навигационный, инерциальный, морской, стандарт, национальный, комитет, технический.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) в последние годы широко применяются на подвижных платформах всех видов – авиационных, морских, космических, сухопутных. Востребованность в таких важных отраслях объясняет наличие рынка БИНС как в Российской Федерации, так и за рубежом. Разнообразие задач использования БИНС ведёт к многообразию разработчиков, проектирующих подобные системы «под себя». Это порождает разнородность характеристик БИНС, способов их нормирования и контроля. Отсутствие стандартизации в этой области означает, по сути, отсутствие унифицированных требований к БИНС, что приводит к невозможности сравнения систем разных производителей. Вопрос о создании национальных стандартов по заданию и контролю характеристик БИНС морского применения (МП) был рассмотрен на специализированной рабочей группе. Было признано, что разработка стандартов силами основных отечественных разработчиков и производителей БИНС, а также их активных пользователей, позволит упорядочить рынок с учётом интересов всех его субъектов. Это, в свою очередь, упростит выбор заказчиками подходящих систем и, главное, повысит эффективность их применения. Таким образом, стандартизация в этой области была признана актуальной.

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» имеет большой опыт проектирования и внедрения БИНС МП в свои разработки. Концерном успешно поставляются БИНС на волоконно-оптических гироскопах: малогабаритная система курсоуказания «Бекар-Э», бесплатформенные инерциальные навигационные системы «Бемоль» и «Бемоль-Н», миниатюрная интегрированная инерциальная спутниковая система навигации и ориентации «Мининавигация-1», спутниковый компас «Вега» с инерциальной поддержкой.

Кроме того, разрабатываемые БИНС встраиваются в интегрированный комплекс навигации, управления движением и связи морских транспортных судов «Широта»; систему информационной поддержки безопасности плавания морских судов в ледовых условиях «Арктика-И»; комплекс связи «Дистанция-Э», автономную систему определения ориентации низкоорбитальных космических аппаратов; систему инерциальной навигации и стабилизации «Ладога-МЭ»; малогабаритный навигационный комплекс «Аппасионата-Э». Концерн располагает необходимыми специалистами и оборудованием. В соответствии со всем вышесказанным администрацией было принято решение инициировать создание Проектного технического комитета (ПТК), организовать и обеспечить его работу в качестве секретариата ПТК.

Заявка на создание комитета по стандартизации с целью разработки национального стандарта ГОСТ Р «Оборудование навигационное судовое. Системы бесплатформенные инерциальные навигационные морского применения. Нормирование и контроль показателей назначения» была составлена с опорой на следующие два обстоятельства.

Во-первых, разработка стандартов назрела в силу сложившегося положения на рынке БИНС. Как уже было отмечено выше, разработчики таких систем устанавливают различные перечни нормируемых характеристик БИНС, зачастую несопоставимых, а также используют различные методы их контроля, корректность которых не всегда обоснована. Для примера можно ознакомиться с рекламными материалами на БИНС различных компаний с указанием их нормируемых характеристик. Есть также различия в наименовании режимов работы БИНС (инерциальный режим и автономный режим, автономный режим с коррекцией по лагу, комплексный режим и обсервационный режим и т.д.). Такое положение затрудняет (в ряде случаев делает невозможным) сопоставление БИНС различных конструкций и, соответственно, обоснованный их выбор для комплектования навигационных и иных комплексов на конкретных судах и других морских объектах (носителях).

За рубежом подобная проблема решена. Прежде всего, имеются широко используемые разработчиками стандарты IEEE, в том числе документы по нормированию и методам испытаний инерциальных датчиков навигационной информации, включая волоконно-оптические гироскопы [1] и интегрирующие гироскопы для бесплатформенных применений [2], а также по терминологии [3], испытательному и

измерительному оборудованию и методам сбора и анализа данных [4]. Кроме того, государствами, входящими в состав НАТО, ратифицирован основополагающий документ по стандартизации погрешностей навигационной информации, который используется для оценки точности навигационной информации [5, 6].

Российские разработчики и производители морских БИНС (такие как АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ПАО «ИНППК», ООО «НПК «Оптолинк» и другие) в настоящее время не имеют аналогичных нормативных документов, что объясняет разницей в нормировании и контроле характеристик изделий.

Прямое применение в отечественной практике указанных зарубежных стандартов невозможно ввиду существенных отличий доступной российским производителям испытательной базы.

Во-вторых, имеющиеся на отечественном рынке БИНС весьма специфичны как в отношении разнообразных датчиков навигационной информации (волоконно-оптические, лазерные и др.), так и в отношении алгоритмических средств, используемых для формирования инерциального трехгранника. Эта специфика делает БИНС МП (которые ныне чрезвычайно популярны и интенсивно развиваются) особой, относительно замкнутой, категорией инерциальных систем.

В 2018 г. были начаты работы по формированию ПТК на основании Федерального закона [7] и требований стандартов [7-9]. В соответствии с Приказом Росстандарта от 18.10.2019 г. № 2490 создан ПТК 709, в состав которого вошли организации-разработчики БИНС МП и организации-основные заказчики комплексов. Десять организаций стали полноправными членами ПТК, пять пожелали участвовать в качестве наблюдателей (с совещательным голосом). В план государственной стандартизации был включён первый стандарт - ГОСТ Р «Оборудование навигационное судовое. Системы бесплатформенные инерциальные навигационные морского применения. Нормирование и контроль показателей назначения». После выхода новой редакции ГОСТ Р 1.1 [9], в соответствии с которой роль наблюдателей в составе ПТК была упразднена, состав ПТК был расширен Приказом Росстандарта от 28.12.2020 г. № 2241 до двенадцати членов. Разработка текста проекта стандарта, контроль за ходом работ со стороны Росстандарта, заседания ПТК проводились с соблюдением правил [10, 11]. В конце января 2021 г. в условиях цифровизации и электронного учёта материалов Росстандарт запустил платформу ФГИС «Береста», в которую необходимо было перенести результаты работы комитета, а также процедуры голосования, нормоконтроля и утверждения проекта ГОСТ Р. В соответствии с правилами [10], секретариат ПТК провёл окончательный нормоконтроль стандарта в ФГБУ «РСТ» и получил все необходимые документы для утверждения проекта национального стандарта.

На итоговом заседании ПТК в декабре 2021 г. была принята консолидированным голосованием окончательная редакция проекта стандарта. Приказом Росстандарта от 21.01.2022 г. № 33-ст был утверждён и введён в действие с

01.02.2022 г. национальный стандарт ГОСТ Р 59987–2022 «Оборудование навигационное судовое. Системы бесплатформенные инерциальные навигационные морского применения. Нормирование и контроль показателей назначения». Данный стандарт распространяется на вновь разрабатываемые БИНС морского применения и устанавливает перечень нормируемых показателей назначения (выходных параметров и характеристик БИНС) и методы их контроля. В основных разделах данного документа приведены параметры, вырабатываемые БИНС, их нормируемые характеристики, требования к нормированию приведённых характеристик, описаны методы их контроля при испытаниях на предприятии-изготовителе, на объекте и в процессе эксплуатации. Таким образом, сделан первый серьёзный шаг в направлении упорядочения основных показателей БИНС для предприятий-разработчиков и их основных потребителей, а также намечены и предпринимаются действия по продолжению данной деятельности.

В соответствии с [9], в связи с актуальностью продолжения работ по стандартизации в области БИНС МП и готовностью организаций-участников возбужден вопрос о преобразовании ПТК в Технический комитет (ТК). В качестве основных направлений деятельности ТК было решено выделить следующие: термины и определения, общие технические требования, методики испытаний на соответствие показателей назначения установленным требованиям, правила приёмки и методы испытаний, информационный обмен с потребителем, требования к размещению, использование в высоких широтах, и другие.

В настоящий момент ведётся активная работа по разработке следующего проекта национального стандарта «Оборудование судовое навигационное. БИНС МП. Методики испытаний на соответствие показателей назначения установленным требованиям. Основные положения», а также решается вопрос с Росстандартом о преобразовании ПТК в ТК.

## II. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлены результаты первого этапа работ по стандартизации в области создания БИНС МП. Главным из них является разработка национального стандарта ГОСТ Р 59987–2022 «Оборудование навигационное судовое. Системы бесплатформенные инерциальные навигационные морского применения. Нормирование и контроль показателей назначения». Указаны направления дальнейших работ по разработке комплекса национальных стандартов, который позволит упорядочить терминологию в этой области, методики испытаний, общие технические требования, общие технические условия, особенности применения морских БИНС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEEE Std 952-1997 IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros.
- [2] IEEE Std 529-1980 IEEE Supplement for Strapdown Applications to IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Degree-of-Freedom Rate-Integrating Gyros.
- [3] IEEE Std 1559-2009 IEEE Standard for Inertial Systems Terminology.
- [4] IEEE Std 1554-2005 IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis.
- [5] Гарматенко И. С. Международные стандарты оценки точности навигационной информации // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 8 (2013 6), с. 863-866.
- [6] STANAC 4278. «Method of expressing navigation accuracies» Edition 3, NATO unclassified North Atlantic treaty military agency for standardization. Bureau. 1995. 42.
- [7] Федеральный закон от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации».
- [8] ГОСТ Р 1.0 2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»
- [9] ГОСТ Р 1.1 2020 «Стандартизация в Российской Федерации. Технические комитеты по стандартизации и проектные технические комитеты по стандартизации. Правила создания и деятельности».
- [10] ГОСТ Р 1.2 2020 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные Российской Федерации. Правила разработки, утверждения, обновления, внесения поправок, приостановки действия и отмены».
- [11] ГОСТ Р 1.5 2012 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения».

**Abstract – The pre-requisites of an ordering of the quality checking domain of strapdown inertial navigation systems for marine applications are pointed out. The means chosen for solution of the problem are shown. The results of the Project Technical Committee 709 (Rosstandart’s PTC 709) work on creating the first national standard at the domain are presented. The directions of the future works are given.**

**Key words – standardisation, system, navigation, inertial, maritime, standard, national, committee, technical.**

# Возможности ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» по передаче единицы длины датчикам линейных перемещений

Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, А. А. Москалёв,  
А. Л. Сизов, В. П. Филиппов, З. В. Фомкина  
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: Z.V.Fomkina@vniim.ru

А. Д. Куркова  
ФГАОУ ВО СПбПУ  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: kurkova.ad@edu.spbstu.ru

**Аннотация** — В докладе представлены возможности ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» по передаче единицы длины датчикам линейных перемещений с помощью компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового, зав. № 01-2008, из состава Государственного первичного эталона единицы длины – метра ГЭТ 2-2021, горизонтального длиномера из состава Государственного рабочего эталона 1-го разряда единицы длины и концевых мер длины.

**Ключевые слова** — датчик линейных перемещений, компаратор, длиномер, меры длины концевые плоскопараллельные

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие научно-исследовательские институты и передовые производственные предприятия имеют в своем арсенале и применяют в качестве рабочих эталонов и средств измерений такие приборы на основе лазера, как лазерные измерительные системы, дальномеры, трекары, а также датчики линейных перемещений. Данные средства измерений используются во многих отраслях промышленности, машиностроении, металлургии, авиа- и судостроении и т.д., которые находятся в сфере государственного регулирования. В соответствии с Федеральным законом № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (далее 102-ФЗ) необходимо обеспечивать прослеживаемость таких средств измерений к государственным первичным эталонам единиц величин и проводить нормативно установленные процедуры подтверждения их метрологических характеристик.

Вследствие этого передача единицы длины датчикам линейных перемещений является актуальной задачей для обеспечения высокой точности измерений.

## II. ДАТЧИКИ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Датчики линейных перемещений (далее датчики) — это устройства, предназначенные для определения изменения местоположения объекта и расстояний до объекта. Основными функциями датчиков являются определение положения объекта, отслеживание линейных перемещений объекта, определение геометрических размеров объекта, измерение уровня жидкости и т.д. В зависимости от типа датчики линейных перемещений существенно отличаются по своей конструкции (открытого типа, закры-

того типа, тросовые и др.) и принципу действия (триангуляционные, емкостные, индукционные, оптические, ультразвуковые, потенциометрические, магнитострикционные, вихрековые и др.).

Датчики линейных перемещений являются одним из важных измерительных элементов систем управления и контроля. Они применяются как самостоятельные средства измерений, так и входят в состав других измерительных систем. Датчики линейных перемещений широко используются при проведении испытаний, в решении задач мониторинга и промышленной автоматизации, в станках, гидроцилиндрах и множестве других устройств. Датчики также входят в состав измерительных комплексов, применяемых в качестве рабочих эталонов в соответствии с Государственной поверочной схемой для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм, утвержденной приказом Росстандарта № 2840 от 29.12.2018 г. (далее ГПС) и должны прослеживаться к Государственному первичному эталону единицы длины – метра ГЭТ 2–2021. В таблице 1 приведены метрологические характеристики ряда датчиков линейных перемещений.

## III. МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ ДАТЧИКАМ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Передача единицы длины датчикам линейных перемещений во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» осуществляется с помощью компаратора лазерного интерференционного тридцатиметрового из состава далее ГЭТ 2–2021 (далее компаратора), длиномера горизонтального из состава Государственного рабочего эталона 1 разряда единицы длины – метра в диапазоне 10-6 – 1100 мм (далее длиномера) и мер длины концевых плоскопараллельных (далее КМД).

*Передача единицы длины датчикам линейных перемещений с помощью компаратора*

Основным средством передачи единицы длины в диапазоне от  $10^{-9}$  до 30 м является компаратор.

Компаратор состоит из измерительной системы на основе частотно-стабилизированного лазера, оптико-механической системы, системы контроля параметров окружающей среды и программного обеспечения (далее ПО) [1].



ТАБЛИЦА 1

Тип датчиков	Изготовитель	Диапазон измерений, мм	Пределы допускаемой основной погрешности
Комплексы линейных деформаций КМ-Дельта-8-СМ	ОАО «Авангард», г. Санкт-Петербург	от 0 до 10	$\pm 0,5$ мкм
Датчики линейных перемещений Renishaw RGH24, RGH25F	Фирма «Renishaw plc», Великобритания	от 0 до 1000	$\pm(0,06+0,5 \cdot L)$ мкм, L – измеряемое перемещение в м
Системы диагностические QC20-W ballbar	Фирма «Renishaw plc», Великобритания	от -1 до +1	$\pm 0,25$ мкм
Системы лазерные для измерения перемещений серии Fixturlaser	Фирма «Elos Fixturlaser AB», Швеция	$\pm 12$	$\pm (1 \% L + 1 \text{ ед. мл. разряда})$ , где L – измеряемое перемещение

В зависимости от принципа действия и конструкции, под определенный тип датчика разрабатываются различные вспомогательные устройства. Так, например, для передачи единицы длины тросовым датчикам на подвижной каретке компаратора установлено специальное приспособление для закрепления троса датчика. Для датчиков из состава комплекса линейных деформаций КМ-Дельта-8-СМ, применяемых для измерения деформаций шпилек и подобных им элементов резьбовых соединений, которые имеют определенную специфическую конструкцию, разработано специальное вспомогательное устройство, представленное на рисунке 1 [2].

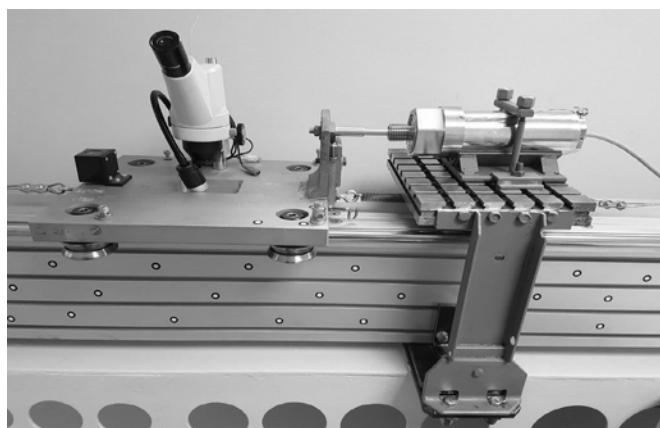


Рис. 1 – Вспомогательное устройство для проверки комплексов КМ-Дельта-8-СМ

Измерения датчиков с помощью компаратора проводят методом сличения с эталоном. Для этого, в зависимости от конструкции, закрепляют датчик на направляющих компаратора, каретке или вспомогательном устройстве, с помощью шагового двигателя каретки задают перемещение, затем одновременно снимают показания с измерительной системы компаратора и с датчика. Абсолютную погрешность измерений определяют как разность между показаниями измерительной системы компаратора и датчика. Данную процедуру проводят при прямом и обратном ходе.

#### *Передача единицы длины датчикам линейных перемещений с помощью дилломера*

Основным средством передачи единицы длины современным высоко-точным датчикам в диапазоне от 10<sup>-9</sup> до 1 м является дилломер Labconcept NANO фирмы «Timos S.A.», Швейцария. Дилломер состоит из основания с направляющими, измерительной каретки с автоматическим управлением, каретки с закрепленным измеритель-

ным щупом, столика для установки средств измерений и двух мониторов [3].

Диапазон абсолютных измерений (0-350) мм, относительных – (0-1100) мм. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений:  $\pm(0,05+0,5 \cdot L)$  мкм, где L – измеряемая длина в м.

Дилломер является современной автоматизированной измерительной системой, не уступающей по своим метрологическим характеристикам лучшим мировым аналогам, в том числе и для передачи единицы длины датчикам линейных перемещений. Так, например, дилломер является основным средством проверки для систем диагностических QC20-W ballbar, предназначенных для измерений линейных перемещений при настройке и проверке станков. На рисунке 2 представлена система диагностическая QC20-W, установленная на измерительном столе дилломера.

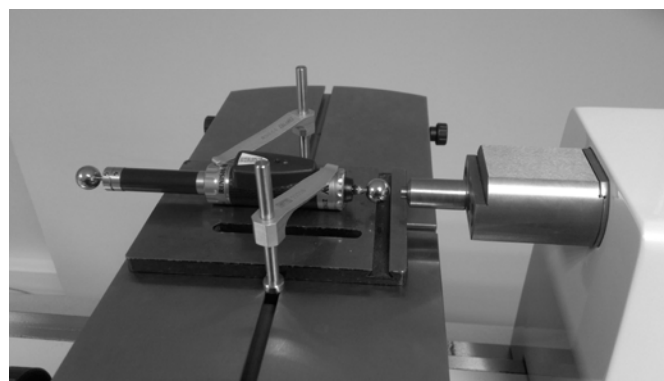


Рис. 2 – Система диагностическая QC20-W

Для передачи единицы длины систему устанавливают и закрепляют на измерительном столе дилломера вдоль измерительной оси. Приводят подвижный сферический наконечник системы в контакт с плоскопараллельным наконечником измерительной каретки дилломера и обнуляют показания дилломера и системы. Последовательно перемещая измерительную каретку дилломера в положительной области диапазона измерений, задают не менее пяти положений подвижного сферического наконечника, равномерно распределенных по всему диапазону. В каждой точке проводят не менее трех измерений расстояния. Перемещение выполняют в прямом и обратном направлениях. Повторяют измерения в отрицательной области диапазона измерений.

За действительное значение расстояния в каждой точке принимают показания отсчетного устройства дилломера.

Абсолютную погрешность измерений расстояния системы в каждой точке диапазона определяют как разность между значением, полученным при помощи системы, и действительным значением расстояния, полученным с помощью длиномера. Наибольшее по модулю значение разности принимают за абсолютную погрешность измерений расстояния. Погрешность передачи единицы длины не превышает 0,05 мкм.

*Передача единицы длины датчикам линейных перемещений с помощью КМД*

В качестве основного средства измерения для передачи единицы длины таким типам измерителей линейных перемещений, как датчики линейных перемещений Renishaw, лазерные системы Fixturlaser и других применяют КМД 1-го разряда. При передаче единицы длины таким датчикам линейных перемещений используют вспомогательное оборудование. Так, например, передачу единицы длины датчикам линейных перемещений Renishaw, предназначенных для координатных измерений геометрических параметров изделий, осуществляют с помощью двухкоординатного измерительного прибора (далее ДИПа). Для этого устанавливают датчик на ДИП и подключают ПО. Затем поочередно устанавливают КМД на ДИП и с помощью ПО определяют их длину. Абсолютную погрешность измерений определяют как разность между значениями, полученными с помощью ПО датчика и действительного значения КМД. Погрешность передачи единицы длины при этом не превышает не превышает 0,06 мкм.

Для передачи единицы длины системам лазерным для измерений перемещений Fixturlaser, предназначенным для определения перемещений контролируемого объекта относительно заданной плоскости или линии при регулировке и наладке оборудования в машиностроении, судостроении, гидроэнергетике и строительстве, где требуется лазерная центровка и измерения вертикальных валов турбин и насосов, а также в других отраслях промышленности, где необходимо производить измерения положения контролируемого объекта, используют стенд для поверки систем лазерной центровки (рисунок 3). Для передачи единицы длины закрепляют неподвижный измерительный блок на поверочной плите, а напротив него на микрометрической подвижке устанавливают подвижный блок. Между подвижной и неподвижной пяткой подвижки помещают КМД, номинальная длина которой соответствует середине диапазона измерений лазерной системы. Устанавливают измерительные блоки друг напротив друга и проводят юстировку системы таким образом, чтобы лазерный луч одного блока в середину фотоприемной площадки другого и наоборот. В полученном положении обнуляют показания системы, а затем последовательно размещают КМД между подвижной и неподвижной пятками стенда, обеспечивая тем самым перемещение одного блока относительно другого на величину равную длине КМД, снимают показания. Измерения проводят не менее чем в пяти точках диапазона измерений. Абсолютную погрешность измерений в каждой точке диапазона определяют как разность между значением, полученным при помощи системы, и действительным значением КМД.

Погрешность передачи единицы длины не превышает 0,003 мм.

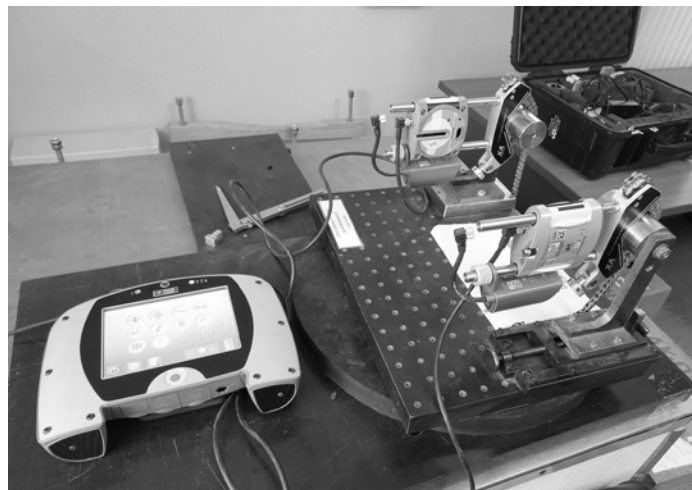


Рисунок 3 – Внешний вид системы Fixturlaser, установленной на стенде для поверки центровщиков

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применяемые во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» методы позволяют осуществлять передачу единицы длины датчикам линейных перемещений с высокой точностью и обеспечивают их прослеживаемость к Государственному первичному эталону единиц длины – метра ГЭТ 2-2021.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Лейбенгард Г. И., Чекирда К. В. Тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор, входящий в состав государственного первичного эталона единицы длины – метра // Измерительная техника. – 2012. – №5. – с. 22 – 26.
- [2] Филиппов В. П., Фомкина З. В. Определение метрологических характеристик высокоточных датчиков перемещений с помощью компаратора лазерного интерференционного // Седьмая международная научно-техническая конференция «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2018)» (15-17 октября 2018 г., Г. Санкт-Петербург) / ред. В. А. Грановский. – СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электрон». – 2018. – с 104 – 106.
- [3] Mosckalev A. A. High-accurate measurements of thread gages using the Labconcept NANO horizontal instrument // 24th National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance 2014. Proceedings. Sozopol, Bulgaria. – 2014. – p 480 – 485.

**Abstract – The report presents the capabilities of D.I. Mendeleev Institute for Metrology of transferring of the unit of length to linear displacement sensors using the 30 m laser linear interferometer from the State Primary Standard of the Unit of Length - meter GET 2-2021, the horizontal instrument from the 1st echelon state working standard of the unit of length and gauge blocks.**

**Key words – linear displacement sensor, 30 meter linear laser interferometer, horizontal instrument, gauge blocks.**

# Современное состояние измерений мер длины концевых плоскопараллельных интерференционным методом

Ю. Г. Захаренко, Н. А. Кононова, Е. И. Логвинюк, К. В. Чекирда  
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия,

E-mail: Y.G.Zacharenko@vniim.ru, N.A.Kononova@vniim.ru, E.I.Logvinuk@vniim.ru, K.V.Chekirda@vniim.ru

**Аннотация** – Данная работа посвящена обзору развития средств и методов измерений мер длины концевых плоскопараллельных. Представлено краткое описание интерферометра Кестерса и метода измерений мер длины концевых плоскопараллельных в диапазоне от 0,1 до 100 мм. Показаны конструктивные особенности лазерных интерференционных установок для передачи единицы длины мерам длины концевым плоскопараллельным ведущих зарубежных национальных метрологических институтов.

**Ключевые слова** — Меры длины концевые плоскопараллельные, интерферометр Кестерса, частотно-стабилизированный лазер

## I. ВВЕДЕНИЕ

Меры длины концевые плоскопараллельные (далее - меры) с момента их появления и применения являются одним из основных доступных средств передачи единицы длины. Несмотря на разработки новых высокоточных средств измерений длины, меры составляют основу парка эталонов предприятий машиностроения. Они используются при поверке, калибровке средств измерений, а также при контроле выпускаемой продукции. На протяжении многих лет совершенствовались технологии изготовления, обработки мер, проводились исследования материалов. Производство мер из карбида вольфрама (WC-Co) и керамики (ZrO<sub>2</sub>) наряду со стальными и твердосплавными мерами позволило расширить их область применения. Данные Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений [1] объективно отражают ситуацию с востребованностью мер, что подтверждает актуальность их метрологического обеспечения.

## II. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ МЕР ДЛИНЫ КОНЦЕВЫХ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ

Для высокоточных измерений мер длиной до 100 мм применяется абсолютный интерференционный метод, реализованный в интерферометрах Кестерса [2]. На их основе построены вторичные эталоны – установки для передачи единицы длины мерам длины концевым плоскопараллельным в диапазоне от 0,1 до 100 мм [3].

Метод измерения длины основан на определении дробной части порядка интерференции последовательно для нескольких спектральных линий используемого источника излучения с учетом поправок на условия изме-

рений. При этом номинальное значение измеряемой меры должно быть известно с погрешностью, не превышающей  $\pm 1$  мкм. Схема типового интерферометра Кестерса предполагает визуальный способ измерения дробной части порядка интерференции. Недостатки данного способа очевидны. Низкая интенсивность спектральных линий, необходимость затемнения помещения приводят к увеличению составляющей неопределенности измерений, вносимой оператором. Кроме этого, данный метод требует больших затрат времени на процесс измерений и обработку результатов.

Данная проблема была решена путем разработки в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» системы регистрации и расчета дробной части порядка интерференции [4]. Специальное программное обеспечение «Кестерс», как часть системы, предназначено для ввода изображения интерференционной картины с цифрового фотоаппарата, вычисления разности фаз между центром меры и плоской стеклянной пластины для разных длин волн и вычисления длины меры. Для последовательного перехода от одной линии спектра к другой применен шаговый двигатель, механически связанный с дисперсионной призмой интерферометра. Применение программного обеспечения совместно с техническими решениями позволило автоматизировать процесс измерений, а также исключить человеческий фактор из процесса обработки результатов. Исследования показали, что расширенная неопределенность измерений меры 100 мм на вторичном эталоне ВЭТ 2-16-77, применяемом в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», составляет 0,07 мкм.

Несмотря на разработку и внедрение специального программного обеспечения все еще применяются установки, в которых считывание полос выполняется путем визуальной оценки.

В качестве источника излучения в интерферометрах Кестерса используются криптоновые (Kr86) и кадмиевые лампы, применяемые в интерферометрии со времен работ Майкельсона и Бенуа. Недостатком применения спектральных ламп является различная интенсивность изображения интерференционной картины для разных длин волн и как следствие влияние на неопределенность результатов отдельных измерений фазы. Следует также отметить отсутствие серийного выпуска спектральных ламп и ограниченный срок службы.

Применение частотно-стабилизированных лазеров позволило принять в 1983 г. Консультативным комитетом по мерам и весам новое определение метра [5]. Это обстоятельство определило основное направление для дальнейшего совершенствования методов и средств измерений длины. Применение частотно-стабилизированных лазеров в интерференционных установках для передачи единицы длины мерам реализовано ведущими зарубежными метрологическими институтами. В связи с тем, что метод счета дробной части подразумевает поиск совпадений дробных частей порядка интерференции, схема установок построена с учетом применяемого метода определения длины меры. Основными элементами большинства таких установок являются частотно-стабилизированные лазеры He-Ne/I2 (633 нм), Nd:YAG/I2 (532 нм), ECDL/Rb (778 нм), система термостатирования, а также система регистрации и обработки результатов измерений [6]. Особенности конструкции национальных эталонов единицы длины метрологических институтов и значения стандартной неопределенности измерений мер номинальной длины 100 мм приведены в таблице 1.

Применение частотно-стабилизированных лазеров, системы регистрации и расчета дробной части порядка интерференции позволяют измерять длину мер номи-

нального значения 100 мм со стандартной неопределенностью, не превышающей 20 нм при условии соблюдения нормальных условий.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Замена спектральных ламп на лазерные источники излучения, а также применение специального программного обеспечения совместно с техническими решениями позволяют сократить время на оценку результата измерений и улучшить метрологические характеристики установок за счет уменьшения значений составляющих неопределенности, обусловленных применяемыми источниками излучения и определением дробной части порядка интерференции.

Современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины позволяет передавать единицу источникам излучения в диапазоне от 500 до 1050 нм [7]. Таким образом, прослеживаемость к Государственному первичному эталону единицы длины – метра ГЭТ 2-2021 делает возможным применение источников лазерного излучения в установках для передачи единицы длины мерам длины концевым плоскопараллельным.

ТАБЛИЦА 1 – ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВЕДУЩИХ ЗАРУБЕЖНЫХ НАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ

Национальные метрологические институты	Источник излучения (длина волны)	Установка	Стандартная неопределенность измерений длины стальной меры 100 мм	Стандартная неопределенность измерений длины керамической меры 100 мм
РТВ (Германия)	Диодный лазер, стабилизированный на атомном переходе Rb (780 нм), He-Ne лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (633 нм, 594 нм) Nd:YAG лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (532 нм)	Модифицированный интерферометр Тваймена-Грина	14 нм	25 нм
SMD (Бельгия)	Частотно-стабилизированный He-Ne лазер (633 нм)	Интерферометр TESA-NPL GBI 300	13 нм	15
METAS (Швейцария)	He-Ne лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (633 нм), Nd:YAG лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (532 нм)	Интерферометр NPL/TESA с программным обеспечением METAS	14,3 нм	15,3
INRIM (Италия)	He-Ne лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (633 нм), Nd:YAG лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (532 нм)	Интерферометр Hilger&Watts	19 нм	18 нм
СМІ (Чехия)	He-Ne лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде (633 нм, 543 нм)	Интерферометр NPL TESA AGI 300	15 нм	17 нм

ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results>.
- [2] Государственная система обеспечения единства измерений. ГОСТ 8.367-79. Меры длины концевые плоскопараллельные образцовые 1 и 2-го разрядов и рабочие классов точности 00 и 0 длиной до 1000 мм. Методы и средств поверки. – Взамен Инструкции 96-65; введ. 01.01.1981. – Москва: Издательство стандартов, 1980. – С. 27-29.
- [3] Приказ Росстандарта от 29.12.2018 N 2840 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от  $1 \cdot 10^{-9}$  до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм».
- [4] Королев А.Н., Лукин А.Я., Кононова Н.А. Аппаратно-программный комплекс для регистрации и обработки массивов видеоданных при измерении концевых мер длины на интерферометре Кестерса // Измерительная техника. - 2003. - № 4. - С. 7-10.
- [5] Definition of Metre. // Metrologia. – 1984, Vol. 19. - P. 163-165.
- [6] Emilio Prieto, Joaquin Rodriguez, Guido Bartl, Hugo Pirée, Felix Meli, Gian Bartolo Picotto, Mauro Franco and Petr Balling Measurement of short gauge blocks by interferometry // Metrologia. - 2022, - Vol. 59.
- [7] Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Косьмина М.А., Фомкина З.В., Чекирда К.В. Современное состояние эталонной базы Российской Федерации в области измерений длины и угла // Измерительная техника. - 2022. - № 7. - С. 18-23. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-18-23>.

**Abstract** – The report is about a review of the development of measurement techniques and measuring equipment for gauge blocks. A brief description of the Kusters interferometer and the measurement technique of gauge blocks measurings in the range from 0.1 to 100 mm are given. The design features of laser interferometers for transferring of the unit of length to gauge blocks of the leading foreign national metrological institutes are presented.

**Key words** – gauge blocks, Köster Interferometer, stabilized laser.

# Разработка комплекса современных рабочих и вторичных эталонов единиц магнитных величин

А.Н. Пронин, И.С. Хасиев  
ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
г. Санкт-Петербург, Россия,  
E-mail: A.N.Pronin@vniim.ru

**Аннотация** — В докладе изложены материалы по разработке комплекса из трех эталонов единиц магнитных величин, приведены их структурные схемы, перечислен состав каждого эталона, указаны метрологические и технические характеристики основных составных частей эталонов и оценен вклад элементов комплекса в погрешности измерений соответствующих эталонов единиц магнитных величин. Разработанный комплекс позволит метрологически обеспечить существующие и перспективные средства измерений единиц магнитных величин.

**Ключевые слова** — магнитная индукция, магнитный момент, поверочная схема.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Основная эталонная база единиц магнитных величин в части воспроизведения магнитной индукции постоянного и переменного поля в диапазоне слабых и сверхслабых магнитных полей, а также в части воспроизведения магнитного момента была разработана более 20 лет назад (аппаратура М076М, М226, М077-1, М116 и др.) и к настоящему времени морально и физически устарела. Существующие эталонные средства указанных трех единиц магнитных величин, как правило, являются единичными образцами и не предназначены для серийного производства, поэтому предложена опытно-конструкторская разработка комплекса из трех эталонов единиц магнитных величин, позволяющая обновить экспериментально-измерительную базу единиц магнитных величин, повысить их точность, расширить диапазон измерений и приблизить их характеристики к требованиям промышленности.

## II. СОСТАВ И НАЗНАЧЕНИЕ

Комплекс современных рабочих и вторичных эталонов единиц магнитных величин (далее — комплекс) разработан в соответствии с требованиями ГОСТ 8.030-2013 [1]. Комплекс включает:

- рабочий эталон 2-го разряда единицы магнитной индукции постоянного поля;
- рабочий эталон 1-го разряда единицы магнитного момента;
- вторичный эталон единицы магнитной индукции переменного поля.

Общим для всех трех эталонов комплекса является расширение диапазонов измерений при высокой точности воспроизводимых (измеряемых) единиц магнитных величин по сравнению с существующими эталонными средствами.

На фоне, по-прежнему, широкого применения трехкомпонентных магнитометров феррозондового типа [2] в последние годы наметилась тенденция широкого использования трехкомпонентных магниторезистивных датчиков, имеющих более высокий верхний предел диапазона измерений. В этой связи напрашивается расширение диапазона и у соответствующей эталонной аппаратуры как в нижней, так и в верхней части диапазона измерений. В частности, рабочий эталон 2-го разряда единицы магнитной индукции постоянного поля (далее — РЭМИ 2) разрабатывается на диапазон от  $\pm 1$  до  $\pm 200000$  нТл, а существующая аппаратура рассчитана на диапазон от  $\pm 10$  до  $\pm 100000$  нТл.

Похожая ситуация складывается в области измерений магнитного момента. Нормы по немагнитности для различных изделий промышленности, связанных с судостроением, космической техникой, авиастроением требуют высокочувствительные средства измерений с очень малыми магнитными моментами, но имеющих значительные габаритные размеры. Запросы промышленности достигают нижних пределов  $0,01 \text{ А}\cdot\text{м}^2$  при габаритных размерах до  $0,75 \text{ м}$  и более. Для этой цели разрабатывается рабочий эталон 1-го разряда единицы магнитного момента (далее — РЭММ 1), рассчитанный на диапазон от  $0,01$  до  $200 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ . Существующая серийная аппаратура имеет нижний предел диапазона измерений  $0,3 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ .

Разработка вторичного эталона единицы магнитной индукции переменного поля (далее — ВЭТ ПМИ) с расширенным диапазоном измерений в сторону сверхслабых полей дополнит возможности государственного первичного эталона ГЭТ 12 2021 [3] и позволит поверять средства измерений в диапазоне от  $0,01$  до  $10000$  нТл на частотах от  $0,1$  до  $20000$  Гц.

Разрабатываемый комплекс предназначен для воспроизведения, хранения и передачи единицы магнитной индукции постоянного и переменного магнитного поля, а также единицы магнитного момента в указанных выше диапазонах измерений. При этом, каждый эталон комплекса может работать самостоятельно и независимо от других эталонов.

**Комплект источников и измерителей  
силы постоянного тока**

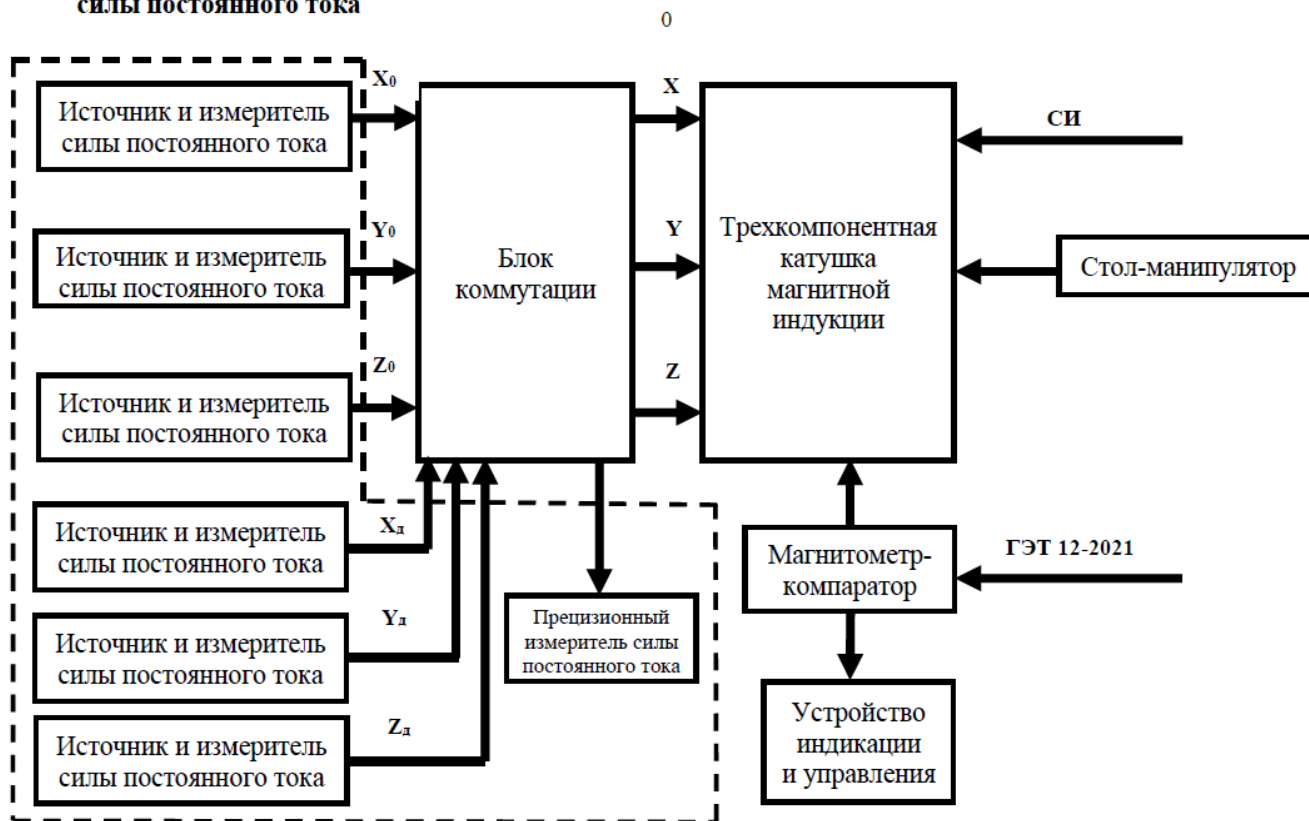


Рис. 1 – Структурная схема РЭМИ 2

### III. ЭТАЛОН РЭМИ-2

Структурная схема РЭМИ 2 приведена на рис. 1.

Основой РЭМИ 2 является трехкомпонентная катушка магнитной индукции с рабочим объемом в виде сферы диаметром 120 мм. Для воспроизведения магнитной индукции постоянного поля в обмотки трехкомпонентной катушки магнитной индукции необходимо подавать высокостабильный ток от источников постоянного тока [4], сила тока которых за время измерений (30 – 60 мин) не вносит заметных погрешностей в суммарную погрешность воспроизводимой магнитной индукции. Допустимая нестабильность силы тока на активно-индуктивной нагрузке не должна превышать  $1 \cdot 10^{-5}$  в широком диапазоне значений от долей миллиампера до 1 А. Необходимое количество источников стабильного тока – шесть для перекрытия всего диапазона воспроизводимых индукций по трем компонентам. В качестве прецизионного измерителя силы тока традиционно используется мера электрического сопротивления и цифровой вольтметр соответствующего класса. Погрешность, обусловленная воспроизведением и измерением силы постоянного тока, не должна превышать 0,02 % на верхнем пределе диапазона измерений магнитной индукции. Переключение источников и измерителей силы постоянного тока между обмотками и компонентами осуществляется с помощью блока коммутации, а установка поверяемого средства измерений (далее — СИ) в рабочий объем трехкомпонентной меры магнитной индукции производится с помощью стола-манипулятора.

Для передачи размера единицы от эталона более высокого класса и поверки РЭМИ 2 служит магнитометр компаратор с устройством индикации и управления, погрешность которого в диапазоне от 20 до 100 мкТл не превышает 1 нТл.

### IV. ЭТАЛОН РЭММ-1

Структурная схема РЭММ 1 представлена на рис 2. Основой РЭММ 1 являются: комплект мер магнитного момента и два компаратора в виде однокомпонентной катушки магнитной индукции с рабочим объемом в виде сферы диаметром 750 мм и безмоментной измерительной катушки с проходным размером 750x750 мм. Однокомпонентная катушка магнитной индукции предназначена для измерений дипольного магнитного момента, в основном, в верхней части диапазона измерений от 2,5 до 200 А•м<sup>2</sup>, а безмоментная измерительная катушка охватывает диапазон от 0,01 до 2,5 А•м<sup>2</sup>. Питание комплекта мер магнитного момента осуществляется через блок коммутации от соответствующих источников силы стабильного тока, дополненных традиционным измерителем силы тока на основе меры электрического сопротивления и прецизионного вольтметра. Погрешность, обусловленная воспроизведением и измерением силы постоянного тока, не должна превышать 0,5 % на верхнем пределе диапазона измерений магнитного момента.

В РЭММ 1 магнитный момент измеряется потоковым методом, когда с помощью микровеберметра (флюксметра) измеряется магнитный поток, наводимый в катушках в виде Э.Д.С., из которого затем вычисляется

значение магнитного момента [4]. Для доставки поверяемого магнитного момента в рабочий объем однокомпонентной катушки магнитной индукции служит вспомогательное оборудование в виде электропривода, перемещающего тележку по рельсовому пути.

С помощью безмоментной измерительной катушки реализуется разновидность потокового метода измерений, называемый методом проходной характеристики,

когда поверяемый магнитный момент проводится сквозь охватывающую катушку, а магнитный момент определяется по площади кривой прохождения [4]. В данном случае используется второй комплект вспомогательного оборудования, где метрологически значимой является постоянство скорости перемещения поверяемого магнитного момента. Поэтому управление перемещением и вычислением магнитного момента управляет компьютер по разработанной оригинальной программе.

ГЭТ 12-2021



Рис. 2 – Структурная схема РЭММ 1

## V. ЭТАЛОН ВЭТ-ПМИ

Структурная схема ВЭТ ПМИ представлена на рис 3.

### Комплект источников и измерителей силы переменного тока

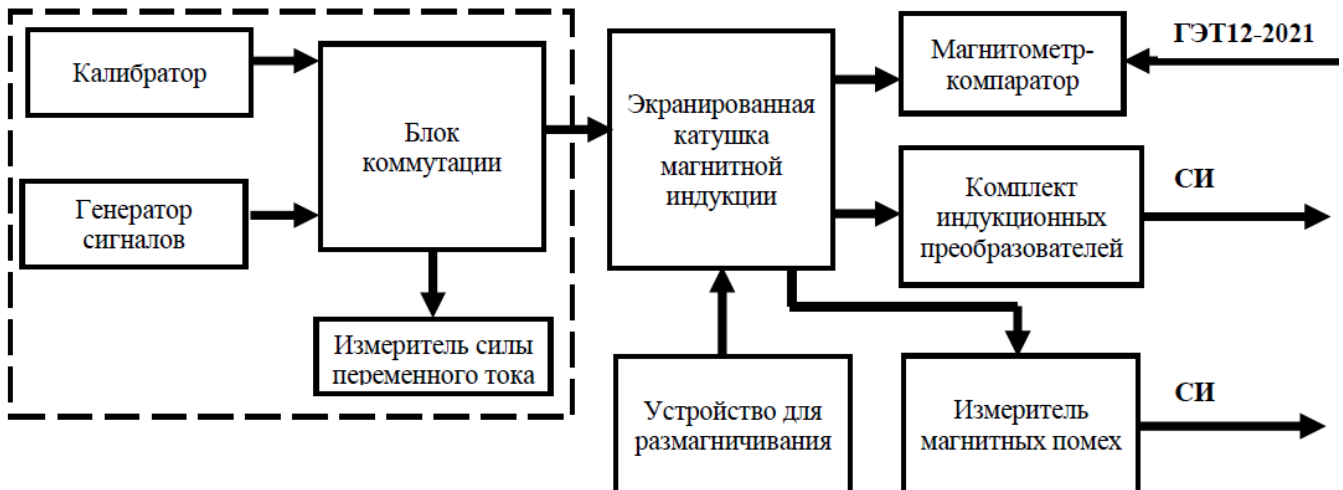


Рис. 3 – Структурная схема ВЭТ-ПМИ

Основой ВЭТ ПМИ является экранированная катушка магнитной индукции, встроенная в ферромагнитный экран с доступным объемом в виде цилиндра с размерами диаметром 150 мм и длиной 1520 мм. Поверочные установки на основе ферромагнитных экранов показали свою эффективность в процессе эксплуатации [5] и использованы нами в данной работе.

Источниками переменного тока для экранированной катушки магнитной индукции являются калибратор силы переменного тока и генератор синусоидальных сигналов, которые перекрывают необходимый диапазон частот от 0,1 до 20000 Гц и амплитуд от 0,003 до 100 мА. Измерение силы переменного тока традиционно осуществляется с помощью меры электрического сопротив-



ления и прецизионного вольтметра. Погрешность, обусловленная воспроизведением и измерением силы переменного тока, не должна превышать 0,5 % на верхнем пределе диапазона измерений магнитной индукции для частот более 20 Гц. Переключение обмоток экранированной катушки магнитной индукции, источников и измерителей силы переменного тока производится в блоке коммутации. В качестве вспомогательного оборудования для обслуживания ферромагнитного экрана применяется устройство для размагничивания последнего. В комплект ВЭТ ПМИ также входят: магнитометр-компаратор для передачи размера единицы от государственного первичного эталона [3], три индукционных преобразователя для передачи размера единицы эталонам более низкого разряда и измеритель магнитных помех, служащий для

исследования магнитной обстановки в местах размещения поверяемых СИ.

#### VI. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСА

Разрабатываемый комплекс в максимальной степени комплектуется серийно выпускаемой аппаратурой, занесенной в Федеральный информационный фонд средств измерений, поэтому определен перечень составных частей каждого эталона, требующих новой разработки и изготовления.

Перечень таких составных частей комплекса с краткими техническими и метрологическими характеристиками представлен в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1 – ПЕРЕЧЕНЬ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСА

Наименование эталона	Наименование составной части	Основные метрологические и технические характеристики
РЭМИ-2	Трехкомпонентная катушка магнитной индукции	Диапазон воспроизводимых значений магнитной индукции в рабочем объеме по компонентам X, Y, Z от 1 до 200000 нТл. Рабочий объем в виде сферы диаметром 120 мм с центром, совпадающим с геометрическим центром трехкомпонентной катушки. Неоднородность магнитной индукции, воспроизводимой в рабочем объеме меры, не более $\pm 0,02$ %.
	Блок коммутации	Малое переходное сопротивление (0,02 Ом) при коммутации компонент катушки магнитной индукции, источников и измерителей тока.
	Стол-манипулятор	Разность высот между нижним и верхним положениями опорной площадки не менее 480 мм. Разворот СИ на 360°. Выставление СИ в горизонтальной плоскости с погрешностью не более $\pm 1'$ .
РЭММ-1	Четырехсекционная катушка магнитной индукции	Рабочий объем в виде сферы диаметром 0,75 м. Неоднородность в рабочем объеме не более 0,5 %. Постоянная по магнитной индукции не менее 200 нТл/мА.
	Безмоментная измерительная катушка	Проходное отверстие превышает диаметр 0,75 м. Постоянная по магнитной индукции не менее 900 нТл/мА в безмоментном включении.
	Комплект мер магнитного момента	Диапазон воспроизведения магнитного момента от 0,01 до 200 А·м <sup>2</sup> . Погрешность воспроизведения на верхнем пределе диапазона не более $\pm 1,5$ %.
	Вспомогательное оборудование в составе: - два рельсовых пути; - две тележки; - два электропривода	Длина рельсового пути 9,2 и 2,9 м. Три скорости движения тележек: 0,2; 0,4; 0,8 м/с. Размеры тележек не более 750x750x73 мм.
	Комплект программного обеспечения	Определение магнитного момента по результатам измерения магнитного потока методом проходной характеристики. Погрешность определения магнитного момента не более $\pm 5$ % на верхнем пределе диапазона воспроизводимых магнитных моментов.
	Блок коммутации	Малое переходное сопротивление (0,02 Ом) при коммутации безмоментной катушки, источников и измерителей силы тока. Минимизация термоЭДС в блоке коммутации.
ВЭТ-ПМИ	Экранированная катушка магнитной индукции, встроенная в ферромагнитный экран	Рабочий объем представляет сферу диаметром 50 мм с центром, совпадающим с геометрическим центром экранированной катушки. Диапазон воспроизводимой магнитной индукции от $10^{-11}$ до $10^{-5}$ Тл. Частотный диапазон от 0,1 до $2 \cdot 10^4$ Гц. Неоднородность магнитной индукции в рабочем объеме не более 0,05 %.
	Блок коммутации	Малое переходное сопротивление (0,02 Ом) при коммутации катушки, источников и измерителей силы тока в частотном диапазоне.

ТАБЛИЦА 1 – ПЕРЕЧЕНЬ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСА

Наименование эталона	Наименование составной части	Основные метрологические и технические характеристики
	Устройство для размагничивания экрана	Максимальный выходной переменный ток частотой 50 Гц не менее 100 А на нагрузку сопротивлением не более 0,1 Ом. Минимальный выходной ток частотой 50 Гц не более 50 мА на нагрузку сопротивлением не более 0,1 Ом. Плавное изменение выходного тока частотой 50 Гц от минимального значения (50 мА) до максимального (100 А) и от максимального до минимального со скоростью изменения значения переменного тока – не более 90 % за 10 с. Время плавного изменения выходного тока частотой 50 Гц от минимального значения (50 мА) до максимального значения (100 А) и от максимального до минимального – не менее 120 с.
	Измеритель магнитных помех	Диапазон частот от 20 до 1300 Гц. Диапазон измерений магнитной индукции от 2 до 200000 нТл. Предел допускаемой относительной приведенной погрешности измерений магнитной индукции $\pm 5\%$ .
	Магнитометр-компаратор	Частотная поправка не более 5 % в полосе от 1 до 10 Гц. Коэффициент преобразования 100 мкВ/нТл в полосе частот от 10 Гц до 10 кГц.
	Комплект индукционных преобразователей	Передача размера единицы магнитной индукции переменного поля к эталонам более низкого разряда с погрешностью не более 1 %.

## VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему моменту разработан весь комплект рабочих конструкторских чертежей и завершается изготовление комплекса. Ведется подготовка к проведению приемосдаточных испытаний.

Существует возможность совершенствования основных метрологических характеристик каждого из трех эталонов комплекса в будущем, используя разрабатываемую аппаратуру в качестве базы, дополняемой новыми блоками и устройствами.

Предлагаемая аппаратура позволит надежно метрологически обеспечить существующие и перспективные средства измерений магнитных величин, применяемые при производстве морских судов, космической и авиационной техники.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 8.030-2013. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции.
- [2] Интеллектуальный феррозондовый магнитометр для расширенного температурного диапазона /А.Н. Пронин, Ю.Н. Бобков, В.В. Привалов, И.С. Хасиев// Сборник научных трудов ВКОР-2019. – 2020. – том 4, часть 1. -С. 96-98.
- [3] ГЭТ 12 2021. Государственный первичный эталон единиц магнитной индукции, магнитного потока, магнитного момента и градиента магнитной индукции.
- [4] Средства измерений параметров магнитного поля /Ю.В. Афанасьев [и др.]. – Л.: «Энергия», Ленингр. отд-ние, 1979. – 320 с.
- [5] Схоменко, А.Н. Опыт реализации метрологического обеспечения индукции магнитного поля для выпуска компонентных аэрокосмических магнитометров в условиях промышленной зоны /А.Н. Схоменко, И.В. Степанов, И.С. Хасиев // Международная научно-практическая конференция «175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений» – СПб.: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», 2017. – С. 76-77.

*Abstract* – The report contains materials on the development of a complex of three standards of units of magnetic quantities, their structural diagrams are given, the composition of each standard is listed, the metrological and technical characteristics of the main components of the standards are indicated, the contribution of the elements of the complex to the measurement errors of the corresponding standards of units of magnetic quantities is estimated. The developed complex will allow metrological provision of existing and promising instruments for units of magnetic quantities.

*Key words* – magnetic induction, magnetic moment, calibration circuit.

# Сравнительные испытания модемов звукоподводной связи

А. И. Машошин, А. В. Шафранюк  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metrolog@eprib.ru

**Аннотация** — В докладе рассматривается вопрос сравнительных испытаний модемов звукоподводной связи. Дороговизна морских испытаний, морской отработки делает актуальной задачу оценку характеристик разрабатываемого, либо разработанного модема с использованием цифрового полигона. Рассматривается как оценка характеристик отдельного модема, так и, в большей части, их сравнительные испытания. В докладе излагаются особенности построения цифрового полигона и его использование для этих целей. Излагаемые предложения возможно использовать при составлении программ и методик испытаний.

**Ключевые слова** — гидроакустический модем, цифровой полигон, испытания

## I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие автоматических систем, в частности автономных беспилотных подводных аппаратов, приводит к росту требований и к системам связи. Наиболее сложно такая проблема стоит для подводной связи [1]. В частности, одним из ключевых моментов по организации сетевой звукоподводной связи, является разработка гидроакустических модемов (ГМ), обладающих продвинутыми характеристиками по сравнению с имеющимися. В связи с этим ставится задача сравнительного испытания модемов звукоподводной связи для выявления наиболее перспективного. В работе рассматривается проблематика программы и методики испытаний, в разрезе формирования подходов к построению ПМИ с использованием цифрового полигона и синтезу показателя эффективности гидроакустического модема для возможности реализации сравнения двух различных модемов. Структура цифрового полигона приведена на рисунке 1.

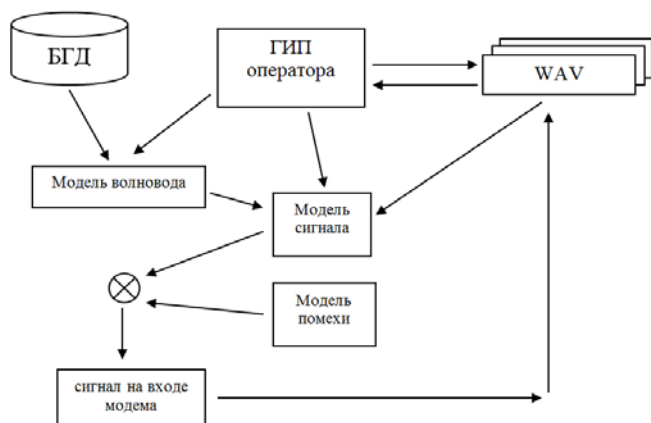


Рис. 1 – Структура цифрового полигона.

Цифровой полигон состоит из графического интерфейса пользователя (ГИП), который позволяет работать со звуковыми файлами, которые разделяются на входные, содержащие тестируемый сигнал и выходными, которые содержат модель входного сигнала ГМ, состоящего из шумов моря и затянутого вследствие многолучёвости сигнала. Соответственно входной сигнал формируется на основе излучаемого ГМ сигнала и может быть получен как путём работы программного обеспечения (ПО) ГМ сразу в виде звукового файла, так и с использованием звуковой карты. Причём при записи посредством звуковой карты сигнал воспринимается либо линейным входом без использования излучающей антенны, либо через микрофон с использованием антенного устройства. При этом с использованием входных фильтров происходит коррекция частотной характеристики сигнала для компенсации воздействия на звук линейного тракта, либо микрофона. В качестве цифрового фильтра предпочтительно используется КИХ-фильтр, либо иные цифровые фильтры [2], обеспечивающие ровность фазовой характеристики в рабочей полосе частот ГМ.

Получаемый выходной сигнал формируется с использованием модели рефрагирующего волновода. Собственно модель формируется системой гидроакустических расчётов с использованием базы гидрологических данных (БГД). В качестве входных параметров здесь выступают, либо заданные географические координаты места и сезон года, либо параметры задаются вручную (вертикальное распределение скорости звука, глубина акватории, наличие ледового покрова и т.п.). Более подробно система цифрового полигона описана в работах [3...5].

Рассматриваемая в работе задача состоит как в формировании подхода к составлению методики испытаний, так и в описании оцениваемых параметров.

## II. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ГМ

Реальная эксплуатация ГМ происходит в условиях рефрагирующего волновода, зачастую на движущихся носителях. Это задаёт набор влияющих факторов, которые определяют основные погрешности ГМ. На рисунке 2 приведена лучевая структура распространения звука в волноводе.

Как видно из рисунка распространение звука происходящее вдоль лучей имеет нелинейный характер, что обуславливает различное время распространения сигнала с последующей суперпозицией в точке приёма. Это приводит к межсимвольной интерференции сигнала ГМ и ошибкам в его декодировании.

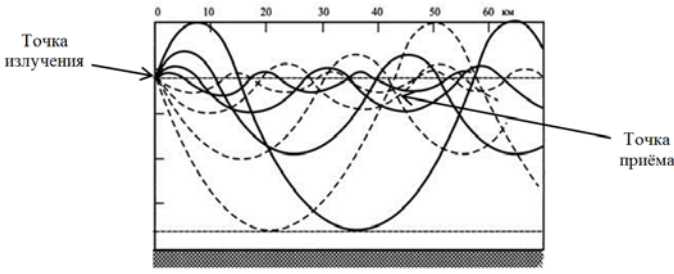


Рис. 2 – Лучевая структура распространения звука в рефракгирующем волноводе.

Помимо интерференции сложная лучевая картина так же дополнительно усложняет эффект Доплера, возникающий при взаимном радиальном движении передающего и принимающего ГМ. Эффект Доплера, приводящий к искажению спектра сигнала может быть сравнительно легко скомпенсирован, однако при распространении звука по различным лучам вследствие зависимости коэффициента Доплера от угла выхода луча и его прихода в итоговом сигнале возникает несколько копий исходного сигнала, претерпевших различные доплеровские сдвиги.

Помимо указанных причин также необходимо учитывать изменчивость вертикального распределения скорости звука, наличие ледового покрова и другие факторы, которые существенно влияют на лучевую картину и на качество работы ГМ.

### III. ВАРИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МОДЕМА И ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ГМ

В целом к характерному показателю качества работы модема можно отнести следующую величину, вычисляемую по факту эксплуатации ГМ:

$$k_{gen} = C_{gen}(D, \Gamma, \Pi_{sgnl}, \mathbf{M}) V_{data}(D, \Gamma, \Pi_{sgnl}, \mathbf{M}), \quad (1)$$

где  $V_{data}$  – объём доставленной до абонента информации за единицу времени (с учётом коррекции ошибок), а  $C_{gen}$  – весовой коэффициент. При этом  $k_{gen}$  и  $C_{gen}$ , зависят от характерных дистанции связи  $D$ , параметров гидрологии  $\Gamma$ , параметров сигналов  $\Pi_{sgnl}$  и параметров движения носителей ГМ  $\mathbf{M} = \{V_{rcv.rad}, V_{src.rad}\}^T$ , где  $V_{rcv.rad}$ ,  $V_{src.rad}$  – значения радиальных скоростей приёмного и излучающего ГМ на связывающую их прямую линию.

Очевидно, что получение такого показателя достаточно сложно. В первую очередь сложно вычисление  $C_{gen}$ , зависящего от множества параметров, что потребует сбора значительной статистики. Сбор статистики в свою очередь увеличит время его расчёта. Кроме того, такой показатель не получится рассчитать для вновь разработанного ГМ, что приведёт к возможно неверному использованию ГМ.

Имея «единый знаменатель» в виде цифрового полигона, возможно вычислить некие показатели, которые позволят провести сравнение различных ГМ и осуществить корректный выбор ГМ для заданных условий работы. Будем вычислять показатель качества на основе формулы (1), положив  $C_{gen} = 1$ , т.к. условия испытаний ГМ предполагаются аналогичными с некоторым стандартизированным набором параметров  $\Pi_{st} = \{D_{st}, \Gamma_{st}, \Pi_{sgnl, st}, \mathbf{M}_{st} = \mathbf{0}\}^T$ . При этом все значения соответствующих параметров определяются экспертным путём при формировании единого реестра результатов испытаний.

Для оценки качества ГМ в зависимости от основных вышеопределённых влияющих факторов в динамике, зададим следующий набор парциальных показателей качества [6] в виде чувствительности к:

- многолучёвости:  $k_{mr.dyn}$ , вычисляемый как коэффициент наклона прямой, аппроксимирующей значения показателя эффективности (1) рассчитанные для  $\Pi_{st}$ , в котором параметр  $\Gamma$  принимает значения числа лучей в волноводе  $N_{ray} > 2$ ;

- доплеровскому сдвигу:  $k_{corr.dyn}$ , вычисляемый аналогично  $k_{mr.dyn}$  для множества значений радиальной скорости взаимного движения ГМ, при  $N_{ray} = 2$ ;

- вариабельности вертикального распределения скорости звука:  $k_{SSP.dyn}$ , вычисляемый аналогично  $k_{mr.dyn}$  на множестве типовых гидрологий  $\{\Gamma\}$ .

Для рассмотрения статического действия мешающих факторов рассмотрим соответствующие показатели качества, рассчитанные по (1) и определяющие рассматриваемых факторов для фиксированных значений:

- $k_{mr.stat}$  – межсимвольной интерференции вследствие многолучёвости для двух лучей, где параметр рассчитывается для  $\Pi_{st}$ , за исключением параметра  $\Gamma$ , который задаётся определяющим двухлучевую модель волновода –  $N_{ray} = 2$ ;

- $k_{corr.stat}$  – раскорреляции сигнала вследствие доплеровского сдвига, рассчитывается для двухлучевой модели волновода  $N_{ray} = 2$  и некоторой радиальной скорости движения ГМ относительно друг друга;

- $k_{SSP.stat}$  – вариабельности вертикального распределения скорости звука, определяемого заданием  $\Gamma$  для типового набора акваторий (либо типовых вертикальных распределений скорости звука) при  $N_{ray} = 1$ .

Рассматривая каждый из параметров можно сказать, что наилучший показатель в части:

- многолучёвости (низкая чувствительность и низкий уровень потерь) является превалирующим фактором для ГМ работающим в условиях мелководья – сплошной акустической освещённости;

- доплеровского сдвига является важным для ГМ, функционирующих на подвижных носителях, либо когда один из носителей подвижен;

- вариабельности вертикального распределения скорости звука является значимым для ГМ имеющих широкий спектр применения, когда носителя такого типа ГМ находятся в различных акваториях и используются в различных гидрологических условиях, в т.ч. в различные сезоны года.

Таким образом, сравнение между ГМ в зависимости от области применения проводится по двум критериям, которые целесообразно объединить в один интегральный:

$$\begin{aligned} k_{mr} &= C_{mr.stat} k_{mr.stat} + C_{mr.dyn} k_{mr.dyn}; \\ k_{corr} &= C_{corr.stat} k_{corr.stat} + C_{corr.dyn} k_{corr.dyn}; \\ k_{SSP} &= C_{SSP.stat} k_{SSP.stat} + C_{SSP.dyn} k_{SSP.dyn}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $C$  – соответствующие весовые коэффициенты, определяемые экспертно при формировании стандартной схемы проведения сравнительных испытаний. Таким образом, интегральным показателем в нашем случае является

величина, зависящая от вероятности потери данных в канале и роста этой вероятности при ухудшении условий. Значения всех показателей имеет смысл сохранять для каждой модификации ГМ в реестре испытаний. При наличии нескольких требований к ГМ представляет интерес производить сравнения значений, вычисляемых следующим образом:

$$k_{int} = \hat{C}_{int.knr}k_{nr} + C_{int.corr}k_{corr} + C_{int.SSP}k_{SSP}, \quad (3)$$

где  $C_{int.knr}$ ,  $C_{int.corr}$ ,  $C_{int.SSP}$  – весовые коэффициенты определяющие значимость в долях влияющих факторов и определяющие условия сравнительных испытаний ГМ для каждого конкретного случая (условий их эксплуатации).

Так же возможно проведение испытаний для целого множества произвольно заданных наборов параметров П, которые представляют интерес при эксплуатации ГМ. В этом случае полученные по (1) показатели качества так же могут быть сохранены в реестре. Однако применение таких показателей качества для сравнительных испытаний является менее универсальным чем (2) или (3). Кроме того, набор таких П со временем может изменяться в связи с предпочтениями потребителей, в результате чего данные по многим ГМ будут просто отсутствовать в реестре и его применение не будет столь эффективным.

#### IV. СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Общий подход к формированию схемы испытаний приведён в [3]. Три возможные схемы таких испытаний приведены на рисунке 3.

Показанная на рисунке 3а схема определяет возможность проверки всей аппаратуры ГМ с использованием микрофона и динамика. При этом в контур проверки попадает как штатное ПО ГМ, так и аппаратная часть с приёмной и передающей антеннами. На рисунке 3б показана схема с исключением антенных устройств. В этом случае задействует линейные вход/выход звуковой карты. На рисунке 3в, в свою очередь, показана схема для проверки только штатного ПО ГМ, когда излучаемый звуковой файл генерируется непосредственно штатным ПО ГМ. Отметим, что схема 3в позволяет достаточно эффективно обрабатывать штатное ПО и алгоритмику ГМ.

По результатам испытания ГМ сохранять в реестре имеет смысл (по возможности) результаты, полученные по всем трём схемам для возможности оценки сравнительных испытаний доработок отдельных ГМ.

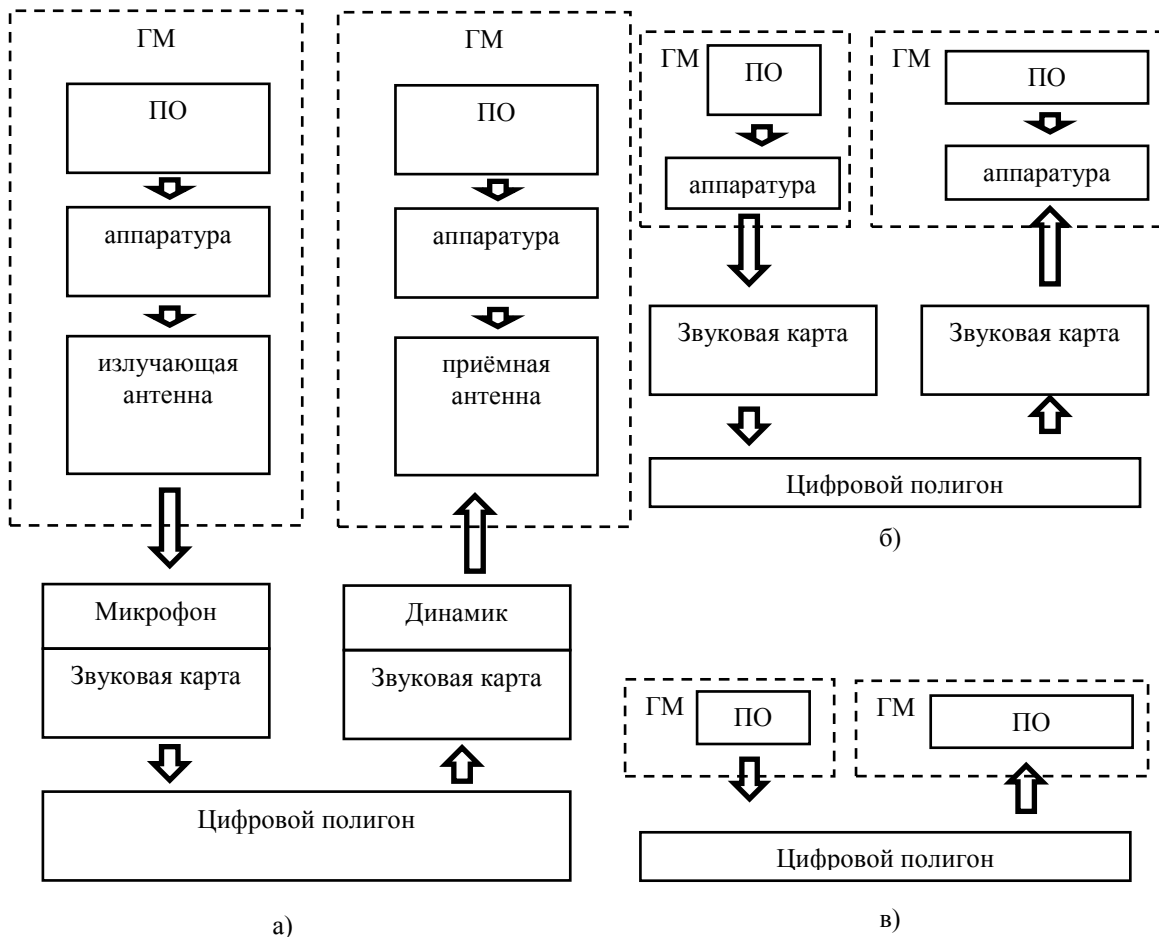


Рис. 3 – Схема проведения испытаний

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе подход к проведению испытаний ГМ позволяет обеспечить единство получаемых результатов и, как следствие, более корректное сравнение как аппаратуры ГМ, так и размещённого на них ПО и соответствующего алгоритмического обеспечения. В свою очередь полученные результаты позволят не только ранжировать ГМ по качеству работы, но и определять для них различные области применения как в части используемых типов сигналов, так и в части предпочтительной области использования (акватории, времени года, наличия, либо отсутствия ледового покрова и т.п.). Таким образом, возможно более оптимальное распределение ГМ по задачам и корректное их использование в комплексах связи.

Другим применением предлагаемой методики является использование на этапе разработки ГМ где получаемые в ходе использования цифрового полигона данные можно сравнивать с уже имеющимися разработками и определять объём и состав работ, необходимых для доведения разрабатываемого изделия до требуемых параметров. При этом полезным моментом будет создание единой таблицы результатов таких испытаний ГМ по всей отрасли, предназначенной для общего использования разработчиками в рамках разработки соответствующих заказов.

При этом необходимо отметить, что реализация самого цифрового полигона не является окончательной. В дальнейшем планируется добавлять учёт факторов, которые будут выявляться в ходе натурных испытаний ГМ. Соответствующим образом потребуются и корректировать подходы к составлению программ и методик испытаний. Аналогичным образом, появление новых натурных данных будет приводить к корректировке весовых коэффициентов при расчёте интегральных показателей качества работы ГМ.

В целом использование цифрового полигона, помимо обозначенных выше задач, позволит существенно сократить как стоимость разработки (за счёт отказа от значительной части натурных отработок), так и время её проведения за счёт отсутствия в необходимости в подготовки экспедиций и их проведения, т.е. оперативности получения необходимых данных.

К основным предложениям авторов относится:

- использование цифрового полигона для унификации условий проведения сравнительных испытаний ГМ;
- введение реестра испытаний ГМ;

- составление стандарта, определяющего на основе вышеизложенного порядок проведения таких испытаний, а также закреплена стандартная алгоритмика цифрового полигона.

*Работа выполнена при поддержке Российского научно-го фонда (проект 22-29-00320).*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кебкэл К.Г., Машошин А.И., Мороз Н.В., Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования // Гирроскопия и навигация. 2019. Т. 27. №2. С. 106-135.
- [2] Александр Сергиенко: Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. - 2-е издание, Питер: 2006, 751.
- [3] Машошин А.И., Пашкевич И.В., Шафранюк А.В., Эмулятор гидроакустического канала для оценки характеристик гидроакустических модемов // Сборник трудов конференции УМС-2022. В печати.
- [4] Шафранюк А.В., Добриков Д.А., Имитационное программное обеспечение для расчёта сигнала гидроакустического модема при его прохождении через водную среду // Сборник трудов конференции УМС-2022. В печати.
- [5] Д.А. Добриков, А.В. Шафранюк, Программа имитации распространения сигналов гидроакустической связи // Сборник трудов XXIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». В печати.
- [6] Роберт Дж. Урик, Основы гидроакустики, Судостроение: 1978, 448 с.

**Abstract** — The report deals with the issue of comparative tests of underwater communication modems. The high cost of sea trials, sea development makes the task of assessing the characteristics of a developed or developed modem using a digital test site relevant. Considered as an assessment of the characteristics of a single modem, and, for the most part, their comparative tests. The report outlines the features of building a digital test site and its use for these purposes. The stated proposals can be used in the preparation of programs and test methods.

**Key words** — hydroacoustic modem, digital polygon, tests

# Качество и надежность технологических систем

В. Г. Стрельцов

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: nukolas96@gmail.com

**Аннотация** — В статье рассматривается модель автоматизированной системы служащая для помощи в принятии решения улучшения качества и надёжность технологической системы на этапе проектирования. Данная система позволяет автоматизировать математические расчёты для получения предполагаемой надёжности технологической системы, а также учитывать метод согласования экспертиз при получении результата.

**Ключевые слова** — надёжность, методом согласования экспертиз, аналого-статический метод, автоматизация, программное обеспечение.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития промышленности огромную роль увеличивающаяся сложность проектных работ на стадии разработки и производства технологических систем. Основным направлением облегчения этих работ является рассмотрение аналогов проектируемой системы (аналого-статический метод), а также метод согласования экспертиз. Автоматизация данных методов позволяет существенно сократить время на стадии проектных работ, а также получить более ясную картину качества и надежности проектируемой технологической системы.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Аналого-статический метод позволяет одновременно перенять положительные стороны аналога разрабатываемой системы, но и обратить внимания на недостатки аналоговой системы. Во-первых, аналогов возможно несколько схожих по нужным характеристикам. Для этого система должна провести квалиметрический анализ аналогов из доступной базы данных. При выборе изделия аналога стоит учесть, что оно должно пройти все испытания и быть принятым в эксплуатацию. В идеальном случае аналог имеет: похожие базы для технического обслуживания и ремонтов; близкие технические характеристики, а также производственные условия. Классификационным показателем могут являться, например, циклограмма или маскогабаритная характеристика. Во-вторых, результаты проведения испытания системы должны быть проверены на наличие грубой погрешности в ходе испытания, а также соответствию закону нормального распределения результатов. Автоматизированная система должна провести анализ графа состояния системы в любой момент времени функционирования проектируемой технологической системы. Взяв за узлы – соответствующие точки траектории движения, а за ребрами граф-модели принять отображения реальных траекторий перемещения исполнительных элементов. [1].

Расчет оценки показателя надежности схемного решения производится по формуле 1 [1]:

$$P = 1 - Q \quad (1)$$

где P - оценка показателя надежности;

Q - оценка суммарных "потерь надежности", которая

$$Q = \sum_i^{N1} q_i + \sum_j^{N2} q_j + \sum_k^{N3} q_k \quad (2)$$

Где i, N1 - соответственно номер и число узлов рассматриваемой граф-модели; j, N2 - соответственно номер и число ребер рассматриваемой граф-модели; k, N3 - соответственно номер и число конструктивных элементов, образующих систему;  $q_i$  - условные потери надежности в  $i$ -х узлах;  $q_j$  - условные потери надежности на  $j$ -х связях (ребрах);  $q_k$  - условные потери надежности в  $k$ -ом механизме.

Расчёт суммарных потерь надёжности проводится по формулам (1), а по формуле (2) оценивается потенциальный уровень надёжности рассматриваемой схемы механической системы.

Но не всегда есть полная характеристика или результаты испытания образца аналога проектируемой технологической системы. Или техническое задание на проектирование технологической системы может опережать технологически возможные аналоги системы. Для этого в разрабатываемой автоматизированной системе должен быть модуль для проведения метода согласования экспертиз, результат которого повлияет на предположительную надежность и качество по расчетам аналога статистического метода. Автоматизированная система должна иметь поля ввода графы надежности или ненадежности, в которые эксперты выставляют свои оценки, а индивидуальные оценки относительной надежности автоматизированная система должна переводить в абсолютную шкалу их относительной надежности. Автоматизированная система при расчетах оценки показателей качества и расчетов должна учитывать ГОСТ 23554.1-79 «Система управления качеством продукции. Экспертные методы оценки качества промышленной продукции. Организация и проведение экспертной оценки качества продукции» [2] в четыре этапа:

На первом подготовительном этапе открывается доступ в автоматизируемой системе руководителю отдела новой разработки для назначения из базы данных членов будущей экспертной комиссия. Так же выбирается цель работы системы.

На этапе работы рабочей группы. Назначенными экспертами проводится отбор на основе созданной в автоматизированной системе специальной базы данных сотрудников различных отделов, а также наличия у них ученой

степени и опыта работы по направлению разработки изделия аналога.

На этапе работы экспертной группы, эксперты производят анализ полученной информации об проектируемом изделии, условиях и особенностях эксплуатации. На основе этого классифицируют различные элементы анализа по их присущим признакам, уделяя внимания не только на конструктивные принципы работы, назначения проектируемого изделия, особенностью эксплуатации. Для результатов работы открывается возможность внесения результатов в автоматизированную систему. Для оценки коэффициента весомости показателей автоматизирования система должна производить расчеты ранжирования, оценивания и парного и последовательного сравнения [3].

На заключительном этапе автоматизированная система должна предложить из базы данных требования, которые будут предъявлены к итоговому документу. Произвести в автоматическом режиме обработку, полученных в результате работы рабочей группы, результатов экспертиз[4]. Но дать возможность после обсуждения полученных данных возможность корректировать выводы работы, так как разрабатываемая система относиться к системе помощи в принятии решения.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представленная автоматизированная система позволит получить представления о качестве и надежности проектируемой технологической системы. А также уменьшить время на математические расчеты, а также выполнения метода согласования экспертиз.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Оценка надёжности артиллерийских комплексов на этапах эскизного и технического проектирования: учебное пособие / Ю. Л. Вященко, С. Н. Казаков, И. В. Любимов. — Санкт-Петербург: БГТУ "Военмех" им. Д.Ф. Устинова, 2011. — 112 с.
- [2] Мешков С.А. Системный анализ сложных технических систем и технология построения современной информационной базы данных надежности с повышенной достоверностью. Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2016 г. № 1-2(91-92). С. 51-58.
- [3] Мешков С.А. Стрельцов В.Г. Оценка надежности и качества изделия на этапе проектирования. Петербургский экономический журнал 2022 г.
- [4] Виноградова, Г.С. Автоматизация процесса выбора компоновки сложных технических систем/А.В. Марков, Г.С. Виноградова, А.И. Денисенко, А.А. Хлебников //Вестник ИрГТУ Том 20 .-№11. - 2016. - С.94-101.

**Abstract** — The article discusses a model of an automated system that serves to help in making decisions to improve the quality and reliability of a technological system at the design stage. This system allows you to automate mathematical calculations to obtain the expected reliability of the technological system, as well as take into account the method of coordinating expertise when obtaining the result.

**Key words** — Reliability, expertise-matching method, analog-static method, automation, software.



# Устройство для измерений угла поворота на основе голографической меры: исследование стабильности и калибровка

К. С. Гороховский  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: begmt@mail.ru

В. А. Грановский  
ФГАОУ ВО «ГУАП»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: valgr39@mail.ru

**Аннотация** — Представлены принцип работы и конструкция устройства, предназначенного для измерений текущего угла поворота качающейся платформы. Устройство основано на использовании новой многозначной меры угла – голографической призмы; индикатором служит ряд ПЗС-линеек. Устройство реализует метод сравнения с мерой, что позволяет исключить влияние орбитального движения на результат измерений и обеспечить его высокую точность. Представлены результаты проверки стабильности и калибровки устройства.

**Ключевые слова** – мера, голографический, угол, поворот, платформа, качающийся, стабильность, калибровка

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для измерений угла поворота качающейся платформы используются различные типы датчиков угла, которые обычно монтируются непосредственно на оси. Такое расположение датчика не позволяет измерить угол в произвольной точке платформы, что на самом деле является насущной проблемой из-за несовершенства конструкции привода и возможных изгибных колебаний платформы. Представленное устройство позволяет решить задачу.

## II. ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ПРИЗМА

Активная многозначная мера плоского угла разрабатывалась и производилась авторами совместно с коллегами – сотрудниками ИТМО в течение нескольких последних лет [1-6]. Призма состоит из небольшого образца фото-термо-рефрактивного стекла, в котором записано некоторое количество голографических решеток, и лазера, используемого для возбуждения голографических решеток. В результате возбуждения создается веер дифрагированных лучей (рис. 1). Каждый из лучей является ответным откликом от конкретной голографической решетки. Все лучи лежат примерно в одной плоскости и имеют локализованный центр пересечения. Плоский угол между каждой парой лучей стабилен. Таким образом, после выполнения процедуры калибровки, пара стекло-лазер становится мерой в полном метрологическом смысле.

Одним из главных свойств меры является высокая стабильность голографических решеток, как во времени, так и в отношении влияющих величин, прежде всего, температуры и механических воздействий.

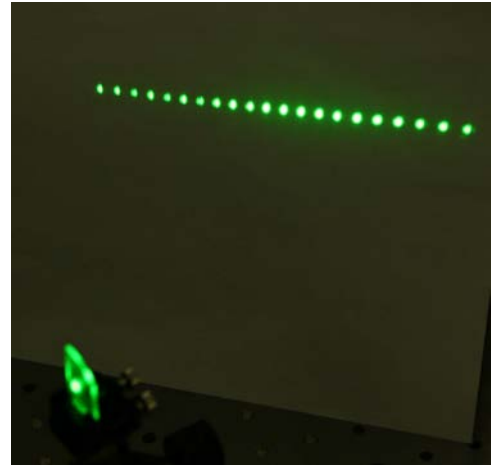


Рис. 1 – Веер дифрагированных лучей

## III. УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ ПОВОРОТА

На основе голографической меры было создано устройство для измерений углов поворота качающейся платформы, с целью ее калибровки и аттестации. Устройство состоит из голографической меры и фоторегистратора.

Голографическая мера имеет возможность воспроизводить 21 луч с углом раскрытия  $50^\circ$ . Фоторегистратор представляет собой ряд из десяти ПЗС-линеек (рис. 2 (На рисунке изображены два ряда ПЗС-линеек, необходимых для реализации предыдущего варианта меры на основе флюорита, с уменьшенным числом решеток [1])), закрепленных на едином основании и соединенных с персональным компьютером, на котором установлено специальное программное обеспечение. Для создания линейной шкалы производится калибровка фоторегистратора, в ходе которой определяется взаимная ориентация ПЗС-линеек.

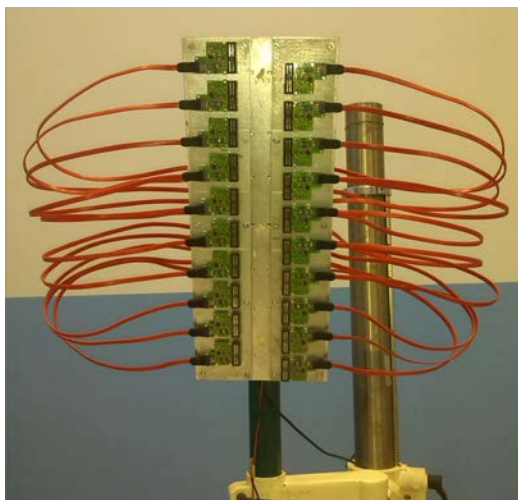


Рис. 2 – Фоторегистратор

#### IV. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Принцип работы устройства заключается в сравнении измеряемой величины с углами, воспроизводимыми мерой. Это сравнение осложняется орбитальным движением центра лучей во время раскачивания платформы. В то время как платформа поворачивается, веер лучей, создаваемых мерой, перемещается вдоль линии ПЗС-линеек. На фоторегистраторе определяются координаты центров следов дифрагированных лучей, с помощью которых определяется траектория движения лучей. Знание траектории и углов между лучами позволяет определить измеряемый угол.

Высокая стабильность точно известных углов между лучами меры позволяет измерять угол поворота платформы с высокой точностью.

#### V. ЭТАПЫ КАЛИБРОВКИ

Из-за особенностей конструкции и высокой требуемой точности устройства его калибровка сложна и не может быть выполнена как единая процедура, касающаяся устройства в целом. Поэтому необходимо выполнять определенную программу, охватывающую ряд процедур, которая выполняется шаг за шагом.

Таким образом, программа калибровки включает в себя следующие процедуры:

1. Проверка стабильности устройства в целом
2. Калибровка фоторегистратора
3. Калибровка голографической меры
4. Калибровка устройства в целом

#### VI. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ

Вследствие того, что принципы работы меры и линейной шкалы фоторегистратора должны гарантировать высокую стабильность, приходится сначала проверить стабильность устройства в целом. Для этого фоторегистратор устанавливается на один фундамент с поворотной платформой. Датчик мгновенного плоского угла закрепляют на платформу таким образом, чтобы как можно больше лучей попадали на чувствительные элементы ПЗС-линеек. После этого периодически в течении одной минуты фиксируются показания ПЗС-линеек, на которые попадают лучи. Полу-

ченные показания обрабатываются и на выходе получают координаты центров масс лучей на соответствующей ПЗС линейке.

В ходе исследований на фотоприемнике регистрировались показания от 4-х лучей. Результаты собранных в течение 7 ч данных, представлены на рисунке 3.

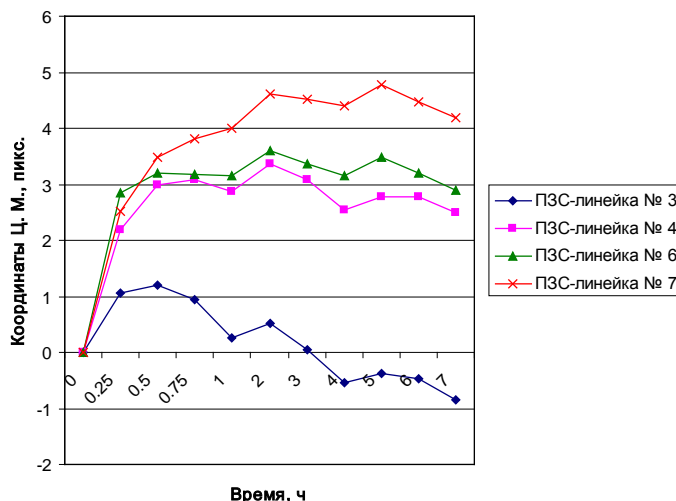


Рис. 3 – Результаты исследований стабильности устройства

Разброс данных составляет не более двух пикселей в течение 7 ч при контроле координат центров масс лучей на шкале фоторегистратора при измерениях на неподвижной платформе, что соответствует 3".

#### VII. КАЛИБРОВКА ФОТОРЕГИСТРАТОРА

Суть калибровки состоит в формировании полной (глобальной) шкалы фоторегистратора, состоящего из 10 ПЗС-линеек, каждая из которых имеет свою локальную шкалу. Формирование глобальной шкалы происходит путем определения взаимного расположения ПЗС-линеек относительно продольной оси линеек. Для этого определяются локальные координаты центров масс зон засветки от лазерной указки закрепленной в щуповой головке трехкоординатной измерительной машины (ТКМ) и координаты щуповой головки ТКМ в системе координат ТКМ. Между указанными локальными координатами центров масс зон засветки и координатами щуповой головки устанавливаются соотношения и таким образом происходит формирование глобальной шкалы.

С учетом имеющегося оборудования можно судить, что глобальная шкала регистратора сформирована с погрешностью менее одной десятой размера пиксела, что соответствует 1,4 мкм.

#### VIII. КАЛИБРОВКА ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ МЕРЫ

Калибровка осуществляется с помощью рабочего эталона плоского угла, погрешность которого не превышает 0,3". Эталон представляет собой взвешенную платформу, которая может вращаться вокруг вертикальной или горизонтальной осей, в зависимости от установки.

Задача калибровки голографической меры – это определение углов между лучами веера. Точность определения углов напрямую влияет на точность устройства в целом.

Калибровка меры предполагает проведение двух юстировочных процедур:

*(а) Минимизация неплоскостности веера*

Неплоскостность веера играет роль условия, необходимого для обеспечения работоспособности устройства. Ширина чувствительного слоя ПЗС-линеек регистратора равна 14 мкм (1 пиксел), в то время как апертура луча веера (радиус пятна на поверхности регистратора) составляет примерно 1 мм. Это означает, что отклонение оси луча от плоскости веера более, чем на 1 мм, приводит к исчезновению сигнала от этого луча на выходе регистратора. Следовательно, неплоскостность веера не должна превышать доли миллиметра. Это можно обеспечить следующим образом.

Лучи веера проецируются на стену, находящуюся от источника на расстоянии 10 м. На стене обозначается полоса (ограниченная двумя параллельными прямыми) минимальной ширины, в которую укладываются все лучи. Внутри полосы, симметрично относительно граничных прямых, обозначаются три параллельных прямых (внутренняя полоса). Крайние линии отстоят между собой на ширину луча (2 мм), а средняя делит внутреннюю полосу пополам. Юстировкой датчика веера добиваются того, чтобы лучи веера поместились в пределах внутренней полосы. В этих условиях можно уловить (при юстировке датчика веера) отклонение оси луча от средней линии, равное половине апертуры, т.е. порядка 0,5 мм. Это означает, что при наибольшем рабочем расстоянии от датчика до регистратора, равном 2 м, неплоскостность веера составит 0,1 мм, т.е. будет пренебрежимо малой. Даже при более грубой юстировке, когда фиксируется отклонение оси луча, равное апертуре (1 мм), неплоскостность в рабочих условиях не превысит 0,2 мм, что достаточно для наличия сигнала на выходе регистратора.

*(б) Выставка плоскости веера перпендикулярно оси вращения эталонной платформы*

Этим обеспечивается расположение веера в вертикальной плоскости и перемещение пятен от лучей на стене по вертикали.

Сохраняем расстояние от датчика до стены (10 м). Юстировкой опоры датчика веера добиваются того, чтобы при повороте платформы вокруг горизонтальной оси центры всех пятен проходили бы через одну и ту же точку фиксации, например, точку, совпадающую с центром пятна от центрального (11-го) луча. Как следует из предыдущего, юстировкой датчика можно обеспечить отклонение центров лучей от точки фиксации, не превышающее 1 мм (в рабочих условиях – 0,1 мм). Эту точку следует совместить с центром ПЗС матрицы.

После выполнения юстировочных процедур, можно перейти непосредственно к калибровке меры.

При повороте платформы на фоторегистратор попадают последовательно пятна от различных лучей веера. Если зафиксировать показание от 11-го луча, т.е. координату центра луча в линейной шкале регистратора, и поворачивать платформу, то будем последовательно фиксировать указанное показание при прохождении центра очередного луча через точку фиксации. Добиваясь подстройкой угла поворота платформы одинаковых показаний фоторегистратора для конкретной пары лучей, фиксируем угол по-

ворота, который совпадает с углом между лучами данной пары.

Углы, воспроизводимые мерой, определены с погрешностью, не превышающей 7".

## IX. КАЛИБРОВКА УСТРОЙСТВА

Калибровка устройства с помощью эталона плоского угла представляет собой, по существу, градуировку шкалы устройства в угловых единицах. Поскольку априори неизвестен вид (функциональная зависимость) градуировочной кривой, то невозможно заранее установить шаг градуировки, который, таким образом, должен быть установлен экспериментально.

Очевидно также, что градуировочная кривая шкалы устройства зависит от расстояния между датчиком веера лучей и регистратором. Это означает необходимость определения ряда кривых для различных расстояний. Дискретность изменений расстояния также должна быть установлена экспериментально.

В соответствии со сказанным выше, калибровка устройства должна включать в себя следующие процедуры:

*а) Начальная выставка регистратора относительно датчика*

При размещении датчика веера в центре платформы эталона крайний (первый) луч должен быть горизонтальным. При этом центральный (11-й) луч составляет с плоскостью горизонта  $22,5^\circ$ . При таком же наклоне к вертикали поверхности ПЗС-линеек регистратора центральный луч ей перпендикулярен, что обеспечивает оптимальные условия в отношении преломления лучей в стеклах, закрывающих ПЗС-линейки. Критерием перпендикулярности может служить равенство отклонений координат (в шкале регистратора) 10-го и 12-го лучей от координаты 11-го луча, которому они симметричны.

Имея в виду количество лучей, попадающих на регистратор в процессе измерений (при качании аттестуемой платформы), нужно признать наилучшей взаимной ориентацией веера и ПЗС-линеек такую, когда в исходном положении (платформа горизонтальна) центральный луч веера попадает в центр регистратора. При заданном расстоянии между датчиком и регистратором такую ориентацию можно обеспечить регулировкой высоты фиксации блока ПЗС-линеек на вертикальной штанге.

*б) Определение шага градуировки*

Критерием останова при последовательном уменьшении шага градуировки является снижение погрешности линейной интерполяции при отсчитывании показаний шкалы до приемлемого уровня, а именно, до величины, составляющей долю (например, одну четвертую) допускаемой погрешности устройства.

Шаг градуировки целесообразно определять при максимальном рабочем расстоянии между датчиком и регистратором, составляющем 2 м. Датчик размещается в центре платформы эталона, а вертикальная несущая штанга регистратора помещается на расстоянии 2,5 м от него. задается определенный шаг поворота платформы, и составляется таблица соответствия показаний устройства и эталона. Затем шаг поворота уменьшается вдвое и фиксирует-

ся показание устройства, которое сопоставляется с двумя ближайшими табличными показаниями, после чего путем интерполяции вычисляется соответствующее показание эталона, которое сравнивается с действительным его показанием. Разность показаний (погрешность интерполяции) сравнивается с допускаемой погрешностью устройства. Если погрешность интерполяции оказывается слишком большой, процедура повторяется с меньшим шагом поворота, если слишком малой – с большим шагом. В результате находится оптимальный шаг градуировки.

*в) Определение дискретности изменений расстояния*

Производится градуировка устройства (с шагом, определенном выше) при двух расстояниях, соответствующих минимальному (примерно 1,0 м от датчика до штанги регистратора) и максимальному (2,5 м) рабочим расстояниям. Сопоставляются попарно угловые показания двух градуировочных таблиц и определяется максимальная разность показаний. Эта разность сопоставляется с допускаемой погрешностью устройства и по результату сопоставления принимается решение о дискретизации расстояния в указанном диапазоне (0,5 – 2,5 м). Если, например, найденная разность превышает вдвое допускаемую погрешность устройства, то, сохраняя использованный выше критерий (одна четвертая), получим шаг дискретизации, равный 0,25 м.

Поскольку погрешность градуировки увеличивается с увеличением расстояния (в силу уменьшения количества лучей, попадающих на регистратор), шаг дискретизации, вообще говоря, не должен оставаться постоянным, а должен уменьшаться с увеличением расстояния, например, от 0,3 до 0,2 м.

## Х. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические предположения о высокой стабильности элементов и устройства в целом. В этих условиях погрешность устройства практически совпадает с суммарной погрешностью его калибровки. Проведенные калибровочные процедуры дают основание полагать, что требуемая исходно точность устройства на уровне нескольких угловых секунд может быть достигнута.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грановский В.А., Кудрявцев М.Д., Рыскин А.И., Щеулин А.С. Новый оптический элемент – «Голографическая призма». I. Принцип действия и экспериментальная реализация // Оптика и спектроскопия, 2009, т. 106, № 5, с. 855-863.
- [1] Granovskii V. A., Kudryavtsev M. D., Ryskin A. I., and Shcheulin A. S. Holographic Prism – The New Plane Angle Measure on Base of Hologram Array in Crystalline Photochromic Nano-material // XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, Sept. 6-11, 2009, Lisbon, Portugal.
- [2] Ангервакс А. Е., Грановский В.А., Кудрявцев М.Д., Рыскин А.И., Щеулин А.С. Новый оптический элемент – «Голографическая призма». II. Методика измерений воспроизводимых углов // Оптика и спектроскопия, 2010, т. 108, № 5, с. 871-877.
- [3] Ангервакс А. Е., Грановский В.А., Кудрявцев М.Д., Рыскин А.И., Щеулин А.С. Новый оптический элемент – «Голографическая призма». III. Экспериментальная реализация голографической призмы модификации II. Сравнительная характеристика двух модификаций голографической призмы с точки зрения ее применения // Оптика и спектроскопия, 2012, т. 112, № 2, с. 343-348.

- [4] Ангервакс А. Е., Гороховский К. С., Грановский В.А., Доан Ван Бак, Иванов С. А., Окунь Р. А., Никоноров Н. В., Рыскин А. И. Голографическая призма на фото-термо-рефрактивном стекле: требования и возможности // Оптика и спектроскопия, 2017, т. 123, № 6, с. 130-136.
- [5] Ангервакс А. Е., Гороховский К. С., Грановский В.А., Доан Ван Бак, Иванов С. А., Окунь Р. А., Никоноров Н. В., Рыскин А. И. Holographic prism based on photo-thermo-refractive glass: new facilities for metrological application // SPIE Optical Systems Design, Conf. 10962 "Optical Fabrication, Testing, and Metrology VI", Frankfurt, Germany, 15-17 May 2018.

**Abstract – The working principle and design of the device for measurement of current rotation angle of rocking platform is presented. The base of the device is the new multivalued angle measure – holographic prism; the row of CCD rulers serves as the indicator. The device realises the comparing with measure method what permits eliminating of an orbital movement effect on a measurement result and ensuring its high accuracy. The device stability checking and calibration results are presented.**

**Key words - measure, holographic, angle, rotation, platform, rocking, stability, calibration.**

# Измерительная система с дистанционной передачей измерительных данных для испытаний моделей кораблей и судов

Н. Н. Скориантов, Р. Н. Целмс  
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[skorintex@yandex.ru](mailto:skorintex@yandex.ru),  
[tselms\\_rn@pochta.tvoe.tv](mailto:tselms_rn@pochta.tvoe.tv),  
[metro-guap@yandex.ru](mailto:metro-guap@yandex.ru)

Н. Е. Кочугуров  
АО «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[office@almaz-kb.ru](mailto:office@almaz-kb.ru)

В. Г. Агафонов  
Главное управление инновационного развития МО РФ  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация** — В докладе представлен способ передачи измерительной информации (данных) полученной в результате проведения испытаний моделей кораблей и судов на открытом водоёме.

**Ключевые слова** — метрологическое обеспечение; измерительный комплекс, передача информации; средства измерений.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для повышения качества и конкурентоспособности создаваемых кораблей и судов в процессе проектирования и документального подтверждения уверенности заказчика в качестве проектируемой (создаваемой) продукции проводятся натурные испытания моделей кораблей и судов на открытом водоёме. На основании экспериментальных данных, полученных в ходе испытания моделей, повышается эффективность проектирования заказов предприятия.

При проведении испытаний моделей кораблей и судов на открытых водоёмах, дистанционная передача экспериментальных данных позволяет исключить использование кабелей, которые помимо того, что имеют ограничения по длине, ещё и могут быть подвержены влиянию электромагнитных помех, что может повлиять на качество получаемой измерительной информации. Благодаря дистанционной передаче данных, появляется возможность проводить испытания моделей на большем расстоянии от оператора, а так же работать автономно, без катера буксировщика.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Чтобы определить характер поведения модели корабля или судна, в том числе характеристик управляемости и мореходности при испытаниях на открытой воде для измерения параметров движения самоходных и буксируемых моделей применяются адаптированные проблемно-ориентированные комплексы (ПОК).

Достоверность полученной измерительной информации с ПОК подтверждается благодаря осуществлению метрологического обеспечения путём проведения плановой поверки и калибровки средств измерений входящих в состав измерительных комплексов. Также осуществляется тарировка средств измерений при помощи поверенных приборов для настройки и установки поправочных коэффициентов.

Полученные метрологические характеристики и показания в результате проведения испытаний обрабатываются, анализируются и передаются специалистам по проектированию.

При разработке измерительной системы с дистанционной передачей данных должны быть решены следующие задачи:

- обеспечение сбора экспериментальных данных;
- представление и первичная обработка экспериментальных данных.

Для осуществления дистанционной передачи данных могут быть использованы:

- радиомодемы;
- Wi-fi передатчики.

Беспроводные системы передачи данных – это устройства передачи данных по радиоканалу. Радиомодемы имеют значительно больший максимальный радиус передачи, чем по кабелю, но меньшую скорость передачи данных. При условиях прямой видимости и малого объема данных, радиомодем может передавать данные на дистанцию до 500 м. Радиомодемы предназначены для создания распределенных беспроводных сетей. С помощью запрограммированных протоколов позволяет организовывать связь между оборудованием с интерфейсами RS422, RS485.

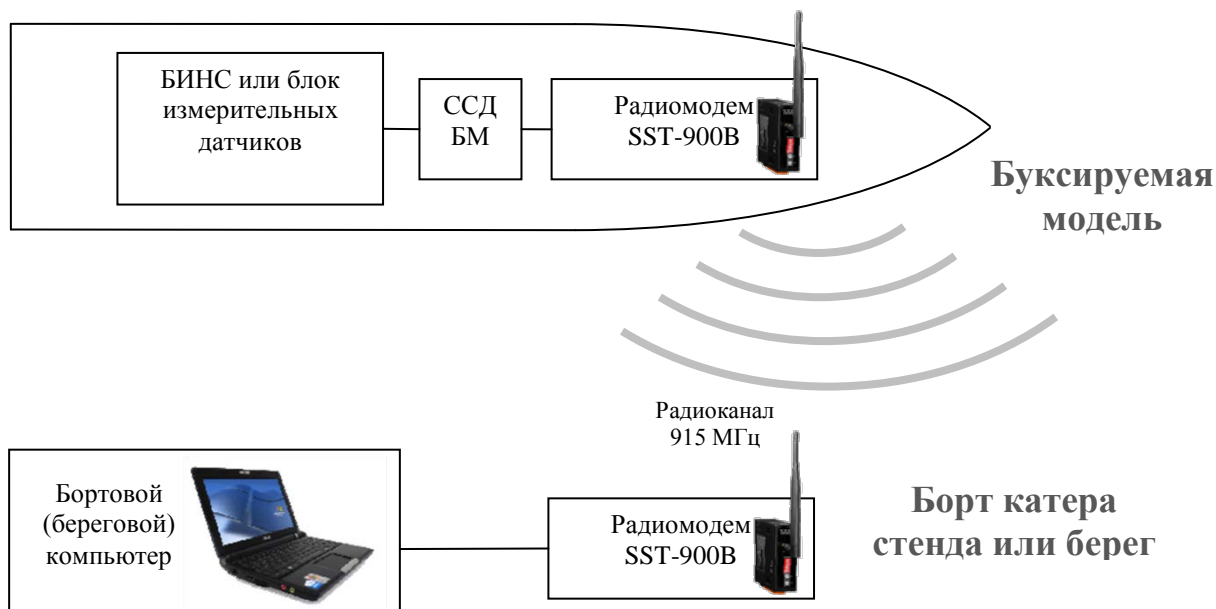


Рис. 1 – Расположение оборудования

Wi-fi передатчики имеют большую пропускную способность по сравнению с радиомодемами и могут быть использованы для передачи большего объема измерительной информации (экспериментальных данных). Также, с помощью Wi-fi можно организовать локальную сеть, со-

единяющую модель и береговой компьютер. В случае, если связь по какой-либо причине будет утрачена на непродолжительное время, запись всей измерительной информации будет дублироваться на Flash-накопитель, установленный на борту модели.

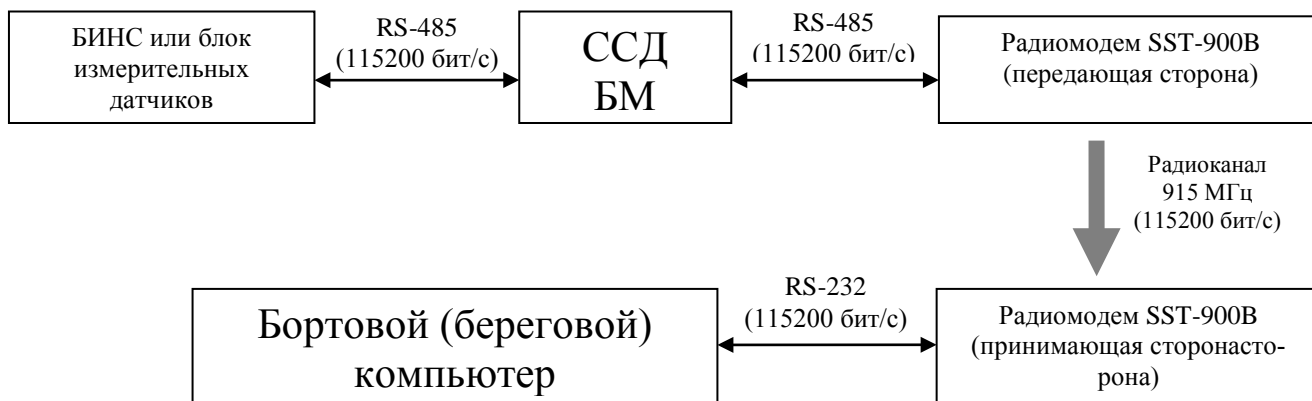


Рис. 2 – Схема

Задача измерительной системы с дистанционной передачей данных передавать получаемую информацию от испытываемой модели на компьютер оператора (бортовой компьютер).

- Радиомодемы позволяют передать до 25 пакетов с данными в секунду.

- В каждом пакете содержатся данные от 12 измерительных датчиков.

Скорость передачи данных и удобство использования радиомодемов на испытательной станции отвечают всем поставленным на данном этапе задачам.

Для защиты достоверности данных, несанкционированной настройки или вмешательства в ПО обеспечивается постоянный надзор и автоматическая проверка контрольной суммы.

После проведения валидации и верификации проблемно-ориентированный измерительный комплекс с дистанционной передачей данных подлежит аттестации, в том числе входящие в его состав система сбора данных (ядра) и программное обеспечение.

Таблица 1

№ байта	Данные								
0-7	Заголовок пакета данных "BINSBMn#".								
	Байт	0	1	2	3	4	5	6	7
	Значение	B	I	N	S	B	M	n	#
	n – номер БИНС БМ ('1', '2' или '3').								
8-11	Системное время, измеряемое в миллисекундах. Тип переменной: UInt32.								
12-13	Выходной сигнал с датчика угловой скорости ωх (в милливольтх). Тип переменной: Int16.								
14-15	Выходной сигнал с датчика угловой скорости ωу (в милливольтх). Тип переменной: Int16.								

16-17	Выходной сигнал с датчика угловой скорости $\omega z$ (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
18-19	Выходной сигнал с акселерометра $a_x$ (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
20-21	Выходной сигнал с акселерометра $a_y$ (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
22-23	Выходной сигнал с акселерометра $a_z$ (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
24-25	Контрольная сумма байтов с 8 по 23.
26-27	Выходной сигнал с акселерометра $az1$ (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
28-29	Выходной сигнал с акселерометра $az2$ (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
30-31	Выходной сигнал с инклинометра дифферента (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
32-33	Выходной сигнал с инклинометра крена (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
34-35	Выходной сигнал с датчика силы №1 (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
36-37	Выходной сигнал с датчика силы №2 (в милливольтгах). Тип переменной: Int16.
38-39	Контрольная сумма байтов с 38 по 39.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрабатываемая измерительная система с дистанционной передачей данных от испытываемой модели на компьютер оператора (бортовой или береговой компьютер) для испытаний моделей судов и кораблей различного назначения позволит расширить и рассмотреть концепцию новых типов испытаний:

- испытания моделей СВП (судно на воздушной подушке) на полигоне (по воде и твёрдой поверхности);
- испытания беспилотных радиоуправляемых моделей судов;
- испытания моделей судов при помощи буксирования тросом в определённой акватории без применения кабелей.

Новые возможности позволят в дальнейшем определять основные и эксплуатационные характеристики будущего судна или корабля в реальных условиях работы.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаров И.Г. Концептуальный анализ в военном кораблестроении. СПб.: Судостроение, 2001. 264 с.
- [2] Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высш. школа, 1982. 231 с.
- [3] Мишура Т.П., Скориантов Н.Н. Метрологическое обеспечение диагностических комплексов для оценки технического состояния энергетического оборудования // Датчики и Системы. 2016. № 1. С. 63-68.
- [4] ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».
- [5] ГОСТ 20911-89. «Техническая диагностика. Основные термины и определения».

**Abstract — The report presents a method for transmitting measurement information (data) obtained as a result of testing models of ships and vessels on an open reservoir.**

**Key words — metrological support; measuring complex, information transmission; measuring instruments.**

# Реализация стационарного режима измерения температуры при определении теплопроводности теплоизоляторов в условиях априорной неопределённости

Нэй Мью Чжо (NayMyoKyaw),  
А. А. Лупачев, В. В. Пойда

Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
г. Москва, Россия  
E-mail: LupachevAA@yandex.ru

А. Р. Пецинярж

Высшая школа экономики  
г. Москва, Россия  
E-mail: arkasha.pe@yandex.ru

**Аннотация** — Работа посвящена исследованиям интервального критерия определения момента наступления установившегося значения сигнала переходного процесса. Данные критерии используются в технологиях, связанных с испытанием сложных объектов и новых конструктивных материалов в условиях параметрической неопределённости их свойств. Решение задачи регистрации установившегося значения актуально также для стационарного метода определения коэффициента теплопроводности композиционных материалов в судостроении. Такие испытания материалов характеризуются значительными динамическими погрешностями при подготовке образцов материалов к измерительному эксперименту, существенно превышающими допустимый уровень. Причинами этого является параметрическая неопределённость теплофизических свойствах объекта и неприспособленность детерминированного интервального критерия правильно выдавать решение в этих условиях. Ранее было определено, что интервальный критерий характеризуется наличием асимптотического критического значения интервального критерия. Превышение тепловой постоянной времени образца над критическим значением даёт неправильный результат в решении. Эта ситуация характеризуется тем, что искомый момент времени ложно определяется существенно раньше, чем оптимальное решение. Это приводит к появлению существенной критической составляющей погрешности, значительно превышающей статический уровень предельной погрешности косвенного измерения искомой физической величины.

Решение задачи гарантированного обеспечения заданного уровня динамической погрешности на всём диапазоне значений динамического параметра модели объекта возможно с применением робастного алгоритма. Основа построения робастного критерия является управление длительностью интервала наблюдения..

**Ключевые слова** — длительность переходного процесса; динамическая погрешность; робастный алгоритм.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является развитием исследований по применению критериев интервального вида (КИВ) для определения момента наступления (ОМН) установившегося значения (УЗ) переходного процесса (ПП) [1 - 3] в

измерительной цепи (ИЦ). При этом КИВ определяется через два параметра:  $\{V_H; \Delta T_H\}$ , где  $V_H$  – допускаемый уровень относительного приращения сигнала ПП на интервале наблюдения  $\Delta T_H$ .

Результатом проведённых ранее исследований являлось определение наличия ограничения на использование КИВ  $\tau_{кр}$ . Это ограничение связано с наличием существенной динамической погрешности (ДП)  $\Delta(t)$  первого рода [4]. Эта погрешность связана с превышением текущей постоянной времени базовой модели ПП над критическим постоянной критерия (КПК). Задача принятия решения КИВ на основе результатов измерений сигнала ПП показана на рис. 1. В качестве базовой модели ПП обычно используется динамическое звено первого порядка [1].

Были определены различные зависимости для КПК в зависимости от соотношения допускаемой динамической погрешности определения УЗ ПП  $\delta_{до}$  и одним из основных параметров КИВ – относительным приращением сигнала ПП  $\rho_H$  на текущем интервале наблюдения  $\Delta T_H$  [5]. КИВ принимает решение о наступлении момента УЗ при:

$$\rho_H \leq V_H. \quad (1)$$

Было обнаружено, что асимптотическим приближением  $\tau_{кр,А}$  для указанных ограничений в применении КИВ является его простейшая форма в виде соотношения (при  $\delta_{до} = V_H$ ):

$$\tau_{кр,А} = \Delta T_H / \ln 2. \quad (2)$$

Точность решения задачи определения ОМН УЗ существенно влияет на временные и материальные затраты на проведение испытаний [6].

Использование в судостроении новых полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих рядом преимуществ перед традиционными конструкционными материалами, в первую очередь, обусловлено возможностью синтеза таких материалов с заранее заданными физическими свойствами [7]. Появление ПКМ связано с необходимостью повысить полезную нагрузку изделий при одновременном снижении их веса и обеспечении их высокой химической, механической и коррозионной стойкости. При глобальном рынке углепластиков, сум-



марным объемом в 35,8 млрд. USD, на российский сегмент рынка морских судов из ПКМ приходится менее 1% [7, 8]. В работе [8] определены основные проблемы в области контроля качества изготовления конструкций из ПКМ.

В целях получения достоверных сведений о техническом состоянии особо опасных и ответственных изделий в настоящее время применяется неразрушающий контроль (НК). Качество конструкций на основе, например, полимерных композитных материалов (ПКМ) определяется [9], в первую очередь, отклонением теплофизических характеристик (ТФХ) материалов от свойств, заданных при конструировании.

Поэтому приоритетное значение приобрели методы автоматизированного неразрушающего контроля, основанные на различных физических принципах.



Рис. 1 – Задача принятия решения на основе результатов измерений

Для решения задачи обнаружения отклонения свойств ТФХ материалов от заданных проводят анализ изменения результатов взаимодействия физических полей с контролируемым материалом. Анализ известных работ, например [10-12], показал, что наиболее перспективным методом НК являются активный тепловой неразрушающий контроль (ТНК)[13].

Как отмечается в [13] «... в настоящее время нет универсальных теоретических моделей, позволяющих рассчитать ТФХ реальных материалов исходя из особенностей их строения, поэтому основным методом определения ТФХ является экспериментальный». Большинство методов измерения ТФХ основаны на анализе температурного отклика на специально организованное тепловое воздействие (в первую очередь – скачок температур). В эксперименте обеспечивают условия одномерного температурного поля  $\theta(r, t)$ , где  $r$  – радиус-вектор локального участка образца (например, пластины) в декартовых координатах:  $x, y, z$ ;  $t$  – время проведения испытаний.

Таким образом, анализу на перепад температур поверхностей образца подвергается одна или ряд хронологических термограмм, которые получены контактным или бесконтактным образом путём цифровой обработки температурного поля вдоль линии сканирования. В работах [14] профессора Кондратьева Г.М. показано, что: «Отличительной особенностью регулярного режима является то, что разность между температурой  $\theta(x, y, z, t)$  любой точки внутри тела с температурой  $\theta_c$  окружающей среды изменяется по простому экспоненциальному закону».

В настоящей работе используется каноническая (классическая) модель измерительного процесса [11], в рамках детерминистского подхода, а под параметрической априорной неопределённостью понимаем значительный разброс в тепловом динамическом отклике на тепловое воздействие при организации измерительного эксперимента.

## II. ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Методы определения теплопроводности разделяются на две группы методов:

- **Нестационарные методы** – основанные на исследовании меняющихся во времени по определенному закону температурных полей;

- **Стационарные методы (СМ)** определения коэффициента теплопроводности, основанные на исследовании неизменных во времени температурных полей, как правило, «более простые и, следовательно, более совершенные» [16].

Для организации измерительного эксперимента был выбран классический СМ, хорошо разработанный теоретически [17, 18] и реализованный в многочисленных моделях как отечественных [19], так и зарубежных средствах измерения (СИ). Методической и метрологической базой для исследований ДП подобных СИ являются отечественные стандарты [20, 21].

В стандарте ГОСТ 7076-99 [20] отмечается, что относительная предельная погрешность определения теплопроводности по методу стационарного теплового режима «не превышает  $\pm 3\%$ , если испытание проведено в полном соответствии с требованиями настоящего стандарта». Однако уровень предельной статической погрешности, достигнутый современными отечественными СИ теплопроводности, существенно превышает заданный в стандарте [20] уровень.

Особое место в исследованиях источников погрешностей измерения теплопроводности стационарным методом занимает погрешность, «обусловленная неполным достижением стационарного режима работы измерительных установок» [18].

При проведении теплотехнического эксперимента неразрушающего контроля ТФХ предполагают, что измеряемые физические величины: тепловой поток на образец и температуры  $\theta_1, \theta_2$  поверхностей образца, должны быть строго постоянными (неизменными) во времени, что возможно только при достижении полностью **стационарного режима работы** измерительной установки.

Априорная информация о материале образца, как правило, отсутствует, особенно если это новый теплоизоляционный материал. Поэтому измерители коэффициента теплопроводности рассчитываются на измерение  $\lambda$  в широком диапазоне возможных значений измеряемой величины и рабочих температур нагрева образца.

Так измеритель теплопроводности ИТП-МГ4 имеет диапазон измерения теплопроводности при стационарном тепловом режиме 0,02... 1,5 [Вт/(м·К)] (т.е. относительный диапазон измерения равен 75); пре-

дел допускаемой относительной погрешности измерения  $\pm 5\%$ ; время единичного измерения при стационарном тепловом режиме, не более 120 минут. Прибор предназначен для испытания образцов при положительных температурах, при этом диапазон регулирования температуры холодильника  $5...25\text{ }^\circ\text{C}$ ; – нагревателя  $25...60\text{ }^\circ\text{C}$ .

В ходе измерительного эксперимента предстоит показать, что существенная ДП получается за счёт не соблюдения основного требования стандарта [20] о стационарности режимов прямых измерения тепловых величин.

### III. РЕАЛИЗАЦИЯ КРИТЕРИЯ ИНТЕРВАЛЬНОГО ВИДА

Область ложноположительных решений характеризуется тем, что КИВ принимает решение о срабатывании, т.е. относительное приращение достигла уровня не более заданного приращения, а при этом динамическая погрешность на конец интервала наблюдения ещё имеет существенное значение по сравнению с заданной  $\Delta_{до}$ . Эта ситуация показана на рис. 1.

Преодолеть возникновение такой ситуации с ложноположительным срабатыванием КИВ при нарушении (1) можно изменяя время наблюдения за сигналом ПП. В цифровом термометре Testo-105 [22] используется алгоритм «AutoHold» с набором переключаемых вручную интервалов наблюдения.

Последнее обстоятельство позволяет приспособлять измеритель к изменяющимся условиям применения в виде ИЦ с различной постоянной времени. Это существенно снижает погрешность ОМП УЗ и, следовательно, динамическую погрешность на момент положитель-

ного срабатывания КИВ и повышает достоверность результата измерения объекта с априорно неизвестным параметром модели ИЦ.

### IV. КРИТЕРИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СОСЕДНИХ ПРИРАЩЕНИЙ

Для решения задачи автоматического переключения интервала наблюдения с поиском эффективного значения длительности интервала наблюдения  $\Delta T_{H,0}$  были проведены исследования влияния параметров сигнала ПП на управляемость  $\Delta T_H$ . Был введён новый параметр «Контролируемый параметр» (КП)  $\Omega$ , который определялся как отношение соседних относительных приращений  $\rho$  для традиционного КИВ:

$$\Omega = \rho_{j-1} / \rho_j. \quad (3)$$

При этом на каждом шаге ( $\Delta T_H$ ) проверялось условие  $\rho_j > V_H$  и вычислялись значения контролируемого параметра. В процессе моделирования работы КИВ было обнаружено, что контролируемый параметр принимает значение  $\Omega = 2$  при  $\Delta T_{H,равном} \tau_{кр.А}$ . Моделирование работы КИВ в пространстве параметров « $\tau$ » и « $\Delta T_H$ » позволило найти ряд закономерностей равномерной дискретизации экспоненциального сигнала ПП. Контролируемый параметр алгоритма принимает значения равные степеням 2.

При анализе результатов моделирования было обнаружено, что рассчитанные значения контролируемого параметра  $\Omega$  образует ряд составленный из чисел степени числа 2: « $\sqrt{2}$ ;  $2^1$ ;  $2^2$ ;  $2^4$ ;  $2^8$ ;  $2^{16}$ ;... и т. д.». Относительная погрешность отклонения составляет от: 3,75 % для  $2^4$  до 2,5 % для  $2^8$  и 6,88 % для  $2^{16}$ .

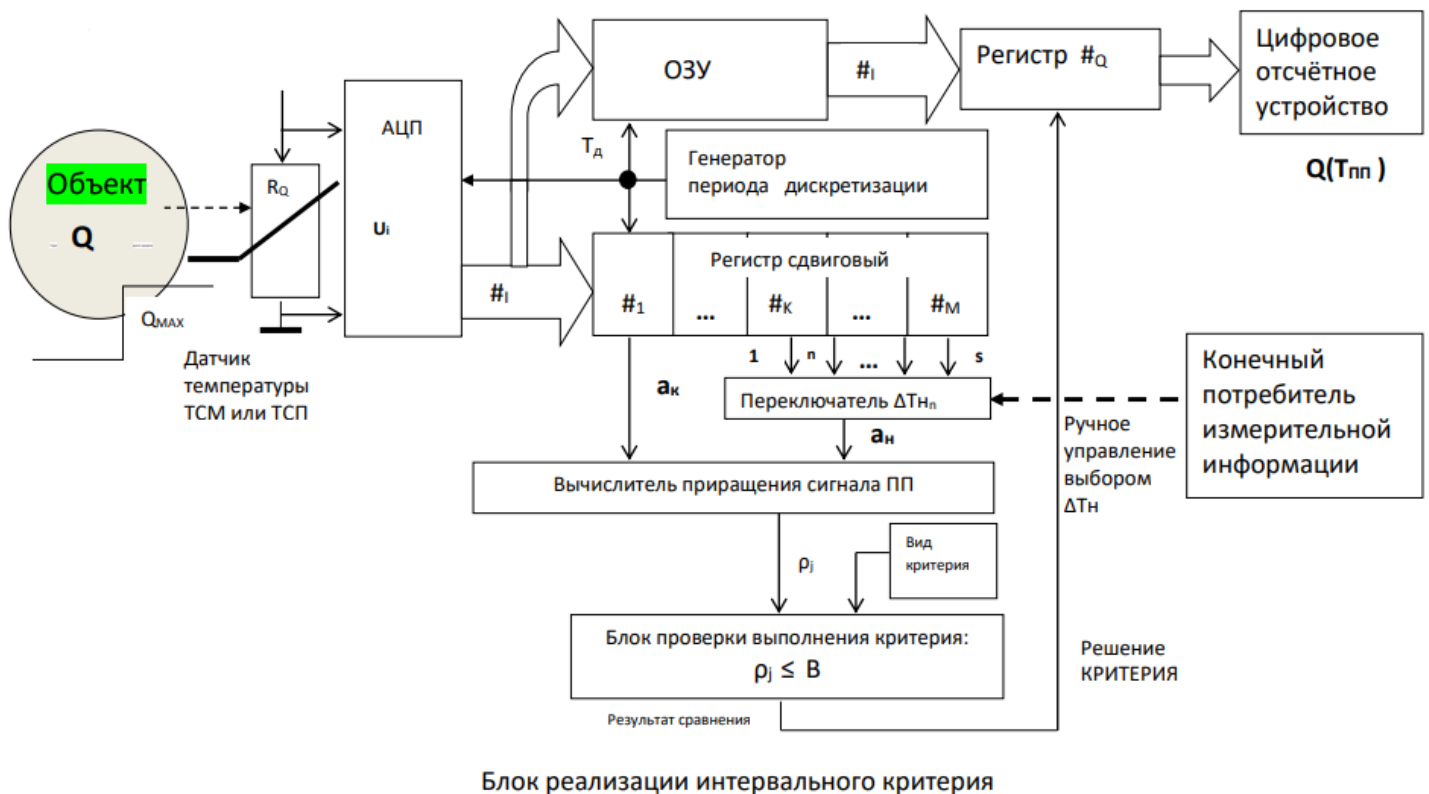


Рис. 2 – Структурная схема известного измерителя с использованием интервального критерия определения установившегося значения сигнала

Так как для экспоненциального сигнала можно вычислить соответствующие критической постоянной критерия относительные приращения  $\rho$ , то возможно аналитически рассчитать и контролируемые параметры  $\Omega$ . Такой расчёт подтверждает точность обнаруженной закономерности, так как абсолютные приращения сигнала при этом образуют ряд:  $\{\dots 4\Delta_N; 2\Delta_N; \Delta_N; \Delta_N/2; \Delta_N/4\}$ .

Было обнаружено, что при соответствии интервала наблюдения критическому значению для каждой из постоянной времени модели, контролируемый параметр принимает значение 2.

Таким образом, было обнаружено, что существует некоторое соотношение в параметрах модели ИЦ и периода равномерной дискретизации выходного сигнала ПП. Этот особый случай получил название «Опорное значение»  $\Omega_R = \Omega(\tau_{CR})$ .

#### V. РЕАЛИЗАЦИЯ РОБАСТНОГО АЛГОРИТМА

Поиск оптимального значения длительности интервала наблюдения  $\Delta T_{H.0}$  основан на текущей информации о сигнале ПП. Модифицированный робастный КИВ (РИК) содержит ещё один параметр  $\Delta T_0$  – величину приращения длительности интервала наблюдения на каждой итерации поиска оптимального значения  $\Delta T_{H.0}$ . На первом этапе исследований эта величина приращения постоянна. Поэтому возможно обозначать РИК относительного вида сочетанием трёх параметров  $\{B_N; \Delta T_N; \Delta T_0\}$ . Опорное значение  $\Omega_R$  характеризует случай, когда найдено оптимальное значение интервала наблюдения  $\Delta T_{H.0}$ . При этом постоянная времени модели соответствует критической постоянной критерия.

При значении контролируемого параметра больше опорного  $\Omega_R$  имеем ситуацию, когда РИК гарантированно найдёт правильное решение за счёт уменьшения длительности интервала наблюдения.

При значении контролируемого параметра меньше опорного  $\Omega_R$  получаем риск ложноположительного решения. При этом длительность интервала наблюдения должна увеличиваться. За счёт этого приближается к области более высоких значений  $\tau_{CR}$ .

Таким образом, происходит настройка параметра критерия (интервала наблюдения) под динамические характеристики измерительной цепи в условиях параметрической неопределённости.

Полученная информация позволяет сконструировать ряд целей управления РИК в виде функционалов  $U$ , причём область определения задана на интервале априорной параметрической неопределённости  $[\tau_{MIN}, \tau_{MAX}]$ .

Критерием качества управления может служить абсолютная величина:

$$U_1 = |\Omega(\Delta T_H) - \Omega_R| = \min. \quad (4)$$

В этом случае, если  $\dot{U}_1 < 0$ , то следует уменьшить интервал наблюдения, а если  $\dot{U}_1 > 0$ , то - увеличить интервал наблюдения. Знак приращения изменяется с « $-\Delta T_0$ » на « $+\Delta T_0$ », так как  $Z = -1$  или  $+1$ .

Следовательно, на каждом цикле расчёта  $U_1$  изменяется  $\Delta T_{H.i}$  в соответствии с рекуррентным соотношением:

$$\Delta T_{H.i+1} = \Delta T_{H.i} + Z * \Delta T_0. \quad (5)$$

Такие итерации происходят не чаще чем через период дискретизации  $T_s$  сигнала ПП.

В соответствии с алгоритмом РИК разработана структурная схема робастной системы обработки сигнала переходного процесса. Структура включает «Наблюдатель», который анализирует поведение контролируемого параметра и сравнивает его текущее значение с опорным значением. На основе вычислений рассчитывается новое значение длительности интервала наблюдения.

#### VI. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для решения задачи нахождения оптимального значения был выбран простейший алгоритм с постоянным шагом изменения интервала наблюдения. Причина выбора данного метода состоит в простоте его реализации. Постоянный размер приращения длительности интервала наблюдения  $\Delta T_{01} = 0,01$  с. Длительность этого шага приращения равна выбранному при моделировании периоду дискретизации  $T_s$  экспоненциального сигнала ПП. Характер процесса адаптации показан на рис. 3 для диаграммы изменения контролируемого параметра РИК.

Результаты цифрового моделирования иллюстрирует рис. 4, на котором показана динамическая погрешность первого рода, достигаемая в итоге работы РИК (в абсолютной  $\Delta_{РИК}$  и относительной  $\delta_{РИК}$  формах).

Положительное срабатывание РИК происходит аналогично КИВ при сравнении относительного текущего приращения с допусковым уровнем. Отличие состоит в том, что в случае использования РИК гарантируется достижение погрешности менее заданного уровня  $\delta_H = 1\%$ . Этот факт подтверждают данные табл. 1: для  $\delta_{РИК}$  и  $\delta_K$ .

#### VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе разработан алгоритм робастной измерительной системы обработки оцифрованного сигнала переходного процесса с целью получения инвариантности решения критерия к априорной параметрической неопределённости модели измерительной цепи.

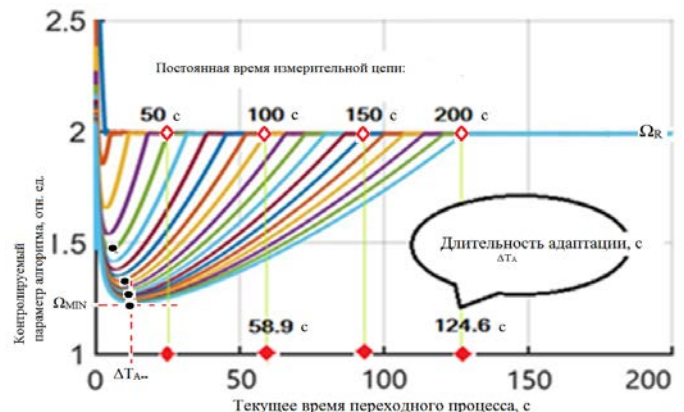


Рис. 3 – Диаграмма изменения контролируемого параметра РИК при  $\Delta T_0.1 = 0,01$  с

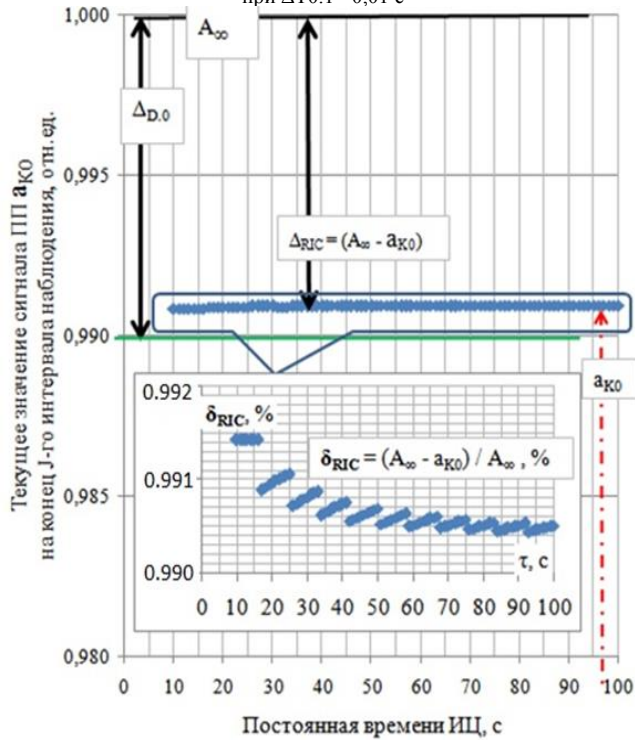


Рис. 2 – Результаты моделирования РИК при  $\Delta T_0.1 = 0,01$  с

Параметры критериев РИК и КИВ

$\tau_i, c$	Параметры критерия РИК: $\Delta T_H = 10 c; \Delta T_0 = 0, 01 c$						КИВ $\delta_K, \%$
	$T_{A_{i-1}}, c$	$\Delta T_{A_{i-1}}, c$	$\Omega_{MHT}$	$\Delta T_{A_{i-1}}, c$	$\Delta T_{HF}, c$	$\delta_{RIC}, \%$	
10	3.0 $\pm 1.0$	-3.0 $\pm 1.0$	2.00	0	7.0 $\pm 1.0$	0,92	0.59 при $\tau = 30 c$
50	25.3 $\pm 1.0$	-5.0 $\pm 1.0$	1.47	20.3 $\pm 1.0$	34.6 $\pm 1.0$	0,91	1.2
100	58.9 $\pm 1.0$	-10.0 $\pm 1.0$	1.40	48.9 $\pm 1.0$	69.2 $\pm 1.0$	0,91	2.8
150	91.5 $\pm 1.0$	-12.0 $\pm 1.0$	1.26	79.5 $\pm 1.0$	104.0 $\pm 1.0$	0,91	4.3
200	124.6 $\pm 1.0$	-13.0 $\pm 1.0$	1.23	111.6 $\pm 1.0$	138.6 $\pm 1.0$	0,91	5.9

ТАБЛИЦА 1. СРАВНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ КИВ ДЛЯ  $\Delta T_H = 30$  с И РИК ПРИ  $\Delta T_0.1 = 0,01$  с

Основой для такой адаптивной системы служит наблюдатель, осуществляющий анализ текущего сигнала переходного процесса. Построение робастного алгоритма опирается на управление длительностью интервала наблюдения традиционного интервального критерия.

По результатам моделирования сделан вывод о корректной работе алгоритма. В работе робастного алгоритма исключена возможность ложноположительного решения критерия на всём интервале априорной неопределённости модели ИЦ.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Бехтин Ю.С., Лупачев А.А., Логинов В.А., Еличева Е.А., Пецинярж А.Р. Интервальный критерий окончания переходного процесса в измерительной цепи при испытаниях // Материалы Седьмой МНТК «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях (СУДОМЕТРИКА-2018)» / ред. В.А. Грановского. - СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. - С. 44-47.
- Y.S. Bekhtin, A.A. Lupachev, N.M. Kyaw, A.V. Kovalenko, A.R. Petsinyarzh. «Robust Interval Criterion for a Steady Value». // Published in: XXX International Scientific Symposium «Metrology and Metrology Assurance. (MMA-2020)» Date of Conference: 7-11 Sept. 2020. Date Added to IEEE Xplore: 16 November 2020 ISBN Information: DOI: 10.1109/MMA49863.2020.9254256 Publisher: IEEE Conference Location: Sozopol, Bulgaria.
- Нэй Мью Чжо, Лупачев А.А., Еличева Е.А., Куликова К.С., Пецинярж А.Р. Результаты исследований интервального критерия установившегося значения при испытаниях сложных объектов. // 12 МНТК "Методы, средства и технологии получения и обработки информации «Шляндинские чтения 2020». Пензенский государственный университет. Пенза, ППИ, 2029. - С 106-108.
- Грановский В.А. Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. - Л.: Энергоатомиздат, 1984.- 224 с.
- Yury S. Bekhtin, Alexey A. Lupachev, Nay MyoKyaw, Tatiana Y. Kovaleva. «Applying an Interval Criterion of Transition Process End for Testing Complex Objects». // Published in: 8-th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO-2019). Date of Conference: 10-14 June 2019. Date Added to IEEE Xplore: 15 July 2019. INSPEC Accession Number: 18848850 Publisher: IEEE. Conference Location: Budva, Montenegro. ISBN 978-1-728.1-1739-3. DOI: 10.1109/MECO.2019.8760030.
- S.L. Rickman, "A Physics-Based Temperature Stabilization Criterion for Thermal Testing." 25th Aerospace Testing Seminar, October 2009. - 22 p.
- Шапошников В.М. Полимерные композиционные материалы в судостроении. - СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. - 12 с.
- Федонюк Н.Н. Проблемы внедрения композиционные материалы в судостроении и их сертификация. - СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2019. - 21 с.
- Муравская Н.П. Метрология в неразрушающем контроле: учеб. пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Издательский дом «Спектр», 2011. - С. 139-199.
- Чистов А.Н., Кладов М.Ю., Пронин И.Б., Смирнов А.С. Экспериментальное определение теплопроводности композиционных материалов в широком диапазоне значений при комнатной температуре. Инженерный журнал: наука и инновации, 2019, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1920>.
- Каледин В.О., Вячкин Е.С., Вячкина Е.А., Будадин О.Н., Козельская С.О. Исследование возможности теплового контроля конструкций из полимерных композиционных материалов при нагреве внутренним источником. // Контроль. Диагностика. № 5, 2019. - С. 26-31.
- Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. / - М.: Издательский дом «Спектр», 2013. - 544 с.
- Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалев А. В. и др. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева. - М.: Машиностроение, 2005. - 656 с.
- Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. - М.: Гостехиздат, 1954. - 408 с.

- [15] Раннев Г.Г., А.П. Тарасенко. Методы и средства измерений: учебник /– М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.
- [16] Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. Ред. Чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 564 с.
- [17] Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: Учеб. Пособие для вузов. – М.: Энергия, 1979.– 320 с.
- [18] Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А.Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: монография. / В 2 кн.– Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. Техн. Ун-та, 2006.– Кн. 1.–204 с.
- [19] Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4. Руководство по эксплуатации Э 12.102.010 РЭ // - Челябинск; ООО «СКБ Стройприбор», 2011. – 45 с.
- [20] ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. –М.: МНТКС, 1999. – 27 с.
- [21] ГОСТ Р 57967-2017. Композиты. Определение теплопроводности твердых тел методом стационарного одомерного теплового потока с охраным нагревателем. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.
- [22] Testo105. Пищевой термометр (LebensmittelThermometer) //– М.:ООО «Тэсто Рус». – 12 с.

**Abstract** — The work is devoted to the study of the interval criterion for determining the moment of the onset of a steady value of the transient signal. These criteria are used in technologies related to testing complex objects and new structural materials under conditions of parametric uncertainty of their properties. The solution of the problem of registering a steady value is also relevant for the stationary method for determining the thermal conductivity coefficient of composite materials in ship-building. Such tests of materials are characterized by significant dynamic errors in the preparation of samples of materials for a measurement experiment, which significantly exceed the permissible level. The reasons for this are the parametric uncertainty of the thermophysical properties of the object and the inability of the deterministic interval criterion to correctly issue a solution under these conditions. Previously, it was determined that the interval criterion is characterized by the presence of an asymptotic critical value of the interval criterion. Exceeding the thermal time constant of the sample above the critical value gives an incorrect result in the solution. This situation is characterized by the fact that the desired time point is falsely determined much earlier than the optimal solution. This leads to the appearance of a significant critical component of the error, which significantly exceeds the static level of the limiting error of indirect measurement of the desired physical quantity.

The solution of the problem of guaranteed provision of a given level of dynamic error over the entire range of values of the dynamic parameter of the object model is possible using a robust algorithm. The basis for constructing a robust criterion is to control the duration of the observation interval.

**Key words** — *duration of transient process; dynamic error; robust algorithm.*

# Проблемы метрологического обеспечения создания оптических систем навигационных устройств

Н. Л. Яворовская, Т. Н. Сирая  
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: metrolog@eprib.ru

**Аннотация** — Рассматриваются вопросы метрологического обеспечения современных прецизионных оптических устройств навигационного назначения. Проведен анализ основных характеристик устройств и методов их контроля, регламентируемых национальными и международными стандартами. Классические методики контроля оптических систем на основе использования стандартизованных телевизионных испытательных таблиц сопоставлены с методиками, использующими современные тестовые объекты (прежде всего, рекомендованные стандартами ISO). Выделены особенности, достоинства и недостатки указанных методик контроля. Намечены первоочередные задачи метрологического обеспечения намеченных методик контроля оптических устройств.

**Ключевые слова** — метрологическое обеспечение, оптическое устройство, тестовый объект, методика контроля

## I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время различные оптические системы (ОптС) широко применяются в навигационной аппаратуре, в частности, в прецизионных оптико-электронных устройствах. К оптическим устройствам предъявляются высокие требования в части показателей назначения, которые они должны обеспечивать при функционировании в сложных рабочих условиях.

Основные характеристики оптических систем и методы их контроля регламентируются как национальными стандартами: ГОСТ Р 58566, ГОСТ 26320, так и международными стандартами: ISO 9334:2012, ISO 12233:2017.

Метрологическое обеспечение создания, испытаний и эксплуатации ОптС (в рамках современной системы обеспечения единства в области оптико-физических измерений) направлено на обеспечение достоверности контроля основных характеристик ОптС на указанных этапах.

Основными характеристиками ОптС, которые нормируются с целью использования в составе навигационных устройств, являются:

- 1) разрешающая способность;
- 2) частотно-контрастная характеристика.

Эти характеристики, в соответствии с действующими документами, определяются следующим образом:

– разрешающая способность - максимальное количество раздельно видимых линий на 1 мм изображения стандартного тест-объекта;

– частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), или функция передачи модуляции – характеристика свойственной изображающим ОптС, оцениваемая как Фурье-преобразование от функции рассеяния линии, описывающей характер размытости изображения отдельной тонкой линии.

Первая характеристика является более простой и наглядной; поэтому ранее она традиционно нормировалась для большинства ОптС. Однако ЧКХ является существенно более информативной (хотя и более сложной) функциональной характеристикой ОптС, на основе которой также можно определить и разрешающую способность. Поэтому при необходимости получения более полной информации о свойствах ОптС целесообразно нормировать и контролировать именно ЧКХ. В связи с этим наблюдается тенденция к переходу на нормирование именно ЧКХ как основной характеристики ОптС.

Принцип действия современных установок для определения ЧКХ основан на измерении пространственного распределения освещенности в плоскости изображения тест-объекта (миры) в виде тонкой щелевой диафрагмы, построенного испытуемым объективом, то есть, функции рассеяния линии.

После преобразования Фурье этой функции и получают коэффициенты передачи модуляции на различных частотах, то есть частотно-контрастную характеристику.

В настоящем докладе рассматривается проблема обеспечения достоверного контроля разрешающей способности и ЧКХ ОптС. Не претендуя на анализ оптико-физических аспектов задачи, далее излагаются только структурно-метрологические вопросы, которые необходимо решать в рамках данной проблемы.

При этом можно выделить две группы методик, первая из которых связана с непосредственно контролем разрешающей способности ОптС, а вторая – с определением и контролем ЧКХ. При этом первая группа, скорее, относится к прежнему поколению ОптС, а вторая – к перспективным системам.

## II. СТАНДАРТИЗОВАННЫЕ МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ТАБЛИЦ

Задачи и методы контроля разрешающей способности ОптС сравнительно подробно проработаны, в основном, применительно к предыдущему поколению аппаратуры. Стандартизированные методики контроля разрешающей способности чаще всего основаны на использовании испытательных таблиц [1]. Построение таблиц регламентировано по ГОСТ 14872 [2], их использование – по ГОСТ 26320 [3]. Наиболее часто используются таблицы 0249 и 0286 (по ГОСТ 28459 [4]).

Однако методики контроля на основе тестовых таблиц не вполне отвечают современным метрологическим требованиям, поскольку их возможности ограничены (применительно к современному поколению оптической аппаратуры).

Для определения и контроля более сложной и информативной характеристики - ЧКХ - в настоящее время разработаны стандартизированные методики, например, приведенные в стандарте ГОСТ Р 58566 [5] и рекомендации ISO 12233:2017 [6]. При этом рекомендованы также алгоритмы определения разрешающей способности на основе ЧКХ (для различных уровней значимости).

При подтверждении соответствия ОптС установленным требованиям (включая определение и контроль ЧКХ) – выделяются два аспекта метрологических задач:

- реализация опорной (стандартизированной) шкалы значений контролируемой характеристики;
- обеспечение сличений контролируемого устройства со шкалой и получение искомого значения характеристики.

Прежде всего, опорная (стандартизованная) шкала значений ЧКХ должна быть, в принципе, реализована эталонными средствами организаций Госстандарта РФ.

Однако в области оптико-физических измерений существенным ограничением является то, что точность исходных (эталонных) средств измерений (СИ), которые могут использоваться при определении и контроле ЧКХ, оказывается недостаточной для целей контроля современных ОптС.

В частности, это подтверждает анализ Программы испытаний в целях утверждения типа Устройства для измерения коэффициента передачи модуляции (станции для контроля качества оптических систем ImageMasterUniversalINF 3000 200). В этом случае локальная поверочная схема в рамках ВНИИОФИ не вполне обеспечивает прямую передачу шкалы, и потому реализованы сложные методики измерений.

Другой способ решения приведенных задач предлагается в документах по определению и контролю ЧКХ, включая стандарт ГОСТ Р 58566 и рекомендации ISO 12233:2017.

В частности: функции формирования шкалы выполняют стандартизированные Таблицы (например, по ISO 12233:2017). Эти таблицы являются аналогами стандартных образцов, и их использование, в принципе, было бы перспективно для испытаний ОптС, однако в настоящее время не организована легализация и тиражи-

рование таких таблиц; иначе говоря, передача шкалы потребителям законодательно не обеспечена.

В принципе, возможны и другие пути решения задач, но они не реализованы на практике для широкого пользователя и требуют дополнительной проработки.

## III. КОСВЕННЫЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЧКХ

Как отмечено выше, для реализации методов контроля по ISO 12233:2017 приводятся рекомендованные алгоритмы определения разрешающей способности на основе ЧКХ (для различных уровней значимости), а также их программные реализации (ПО). Таким образом, имеющееся ПО дает возможность комплексировать использование «образцовых» оптических систем и «стандартизованного» ПО для решения задач МЛО создаваемых ОптС.

В таких методиках контроля можно реализовать физически наиболее наглядный метод контроля - так называемый, метод наклонной грани, который позволяет непосредственно определить ЧКХ как функциональную характеристику ОптС. Для этого используются специальные миры, которые позволяют реализовать указанный метод, и соответствующее ПО для расчета ЧКХ и разрешающей способности.

При использовании указанной методики контроля обеспечиваются следующие преимущества (по сравнению с предыдущими методиками):

- методика позволяет получить более полную информацию о свойствах ОптС; в частности, позволяет найти разрешающую способность при различных уровнях контраста;
- в методике использованы наиболее простые миры, геометрические параметры которых имеют наглядный физический смысл, могут быть просто описаны и стандартизованы.

В то же время, при практическом использовании данной методики также возникают определенные трудности, которые связаны с реализацией шкалы, но в данном случае – шкалы для получения функциональной характеристики (то есть, ЧКХ) и разрешающей способности ОптС.

Данный подход наиболее полно соответствует возможностям современных ОптС, требованиям к ним и возможностям их МЛО.

Следует отметить, что при реализации этого подхода приходим к необходимости разработки и аттестации методики измерений, которая включает использование

- стандартизированной (аттестованной) миры (как меры оптических свойств);
- средств измерений утвержденного типа
- регламентированного ISO 12233:2017 алгоритма обработки изображения миры (реализованного программно).

В частности, при аттестации методики измерений следует также подтвердить соответствие использованного ПО требованиям по ГОСТ 9126 [7]. В частности, тре-

буется разработка полного комплекта документации на ПО в соответствии с указанным ГОСТ и отраслевыми документами, включая Программу и методику испытаний (ПМИ) ПО.

После проведения испытаний ПО в соответствии с разработанной ПМИ и аттестации методики измерений возможно реализовать прямое сопоставление двух характеристик (ЧКХ) – полученных СИ утвержденного типа и испытуемой ОптС.

Таким образом, на основании сопоставления двух отмеченных групп методик контроля и анализа опыта МЛО разработок ОптС в нашей организации можно выделить несколько вариантов решения задачи контроля ОптС, которые приведены в таблице 1.

Следует отметить, что в принципе, каждый из отмеченных вариантов может быть реализовано, но они различаются по объему (трудоемкость) их доработки и легализации.

В числе актуальных задач в этой области можно выделить следующие:

- Создание исходных СИ и стандартных образцов (таблиц) для контроля ОптС;
- Разработка и легализация поверочных схем, необходимых для МЛО ОптС;
- Разработка программных средств для «передачи» шкалы оптических характеристик.

Таблица 1 – Сопоставление Методик контроля характеристик оптических систем

	Методика контроля разрешающей способности оптических систем с использованием		
	тест-таблицы 0286	тест-таблицы ISO 12233	тест-объекта (миры, щели) и ПО по ISO 12233
Определение контролируемого параметра	Разрешающая способность R, ТВЛ		ЧКХ (SFR), функциональное преобразование в R, ТВЛ
Метод эталонирования	Тест-таблица 0286 ГОСТ 28459-90	Тест-таблица ISO 12233:2017	Косвенный метод с использованием миры (щели) и алгоритма расчета R
Используемая аппаратура эталонирования (стандартный образец, средство измерений)	Широкоугольный коллиматор (ШК) таблица 0286	Таблица ISO 12233:2017, люксметр	Миры, щели, средства измерений для определения ЧКХ
Сведения о легализации – аттестации ИО и стандартизации СИ	ШК – не аттестован Таблица 0286 ГОСТ 28459-90	Экземпляр Тест-таблицы ISO 12233 – не легализован; люксметр – утвержденного типа	СИ Алгоритм по ISO 12233
Методы измерений и обработки	Визуальный метод, экспертная оценка	Визуальный метод экспертная оценка	Косвенный метод с использованием расчета, сличение ЧКХ
Сведения о стандартизации или аттестации Методик измерений	ГОСТ 28459-90, ГОСТ 26320-84	ISO 12233:2017 – не введен в РФ, ГОСТ 26320-84	Миры – входят в комплект СИ утвержденного типа СИ – утвержденного типа ПО - ISO 12233:2017;
Методы получения и обработки данных при контроле	Визуальные отсчеты, обработка экспертных данных	Визуальные отсчеты, обработка экспертных данных	Регистрация данных, Обработка ПО – по ISO 12233:2017
Перспективы (объем) доработки методики контроля	Требуется калибровка ШК (вместе со встроенной таблицей)	Требуется получить легализованную тест-таблицу по ISO 12233:2017	Требуется разработать и аттестовать методику измерений



#### IV. ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Анализ основных групп современных методик контроля ОптС показывает основные направления метрологических работ в этой области.

Для методик, основанных на использовании стандартизованных таблиц, необходимо организовать легализацию рабочих экземпляров таблиц для пользователей.

Для методик контроля ЧКХ целесообразно разработать и аттестовать методики измерений с использованием программных реализаций стандартизованных алгоритмов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кривошеев М. И. Основы телевизионных измерений. Изд. 2-е. – М., «Связь», 1976. 536 с.
- [2] ГОСТ 14872-82 Таблицы испытательные оптические телевизионные. Типы, размеры и технические требования.
- [3] ГОСТ 26320-84 Оборудование телевизионное студийное и внестудийное. Методы субъективной оценки качества цветных телевизионных изображений.
- [4] ГОСТ 28459-90. Таблица телевизионная испытательная универсальная 0286.
- [5] ГОСТ Р 58566-2019. Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний.
- [6] ISO 12233:2017. Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses.
- [7] ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 Информационная технология. Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководства по их применению.

**Abstract — The range of issues related to metrological assurance of modern optical systems is analyzed. The main characteristics of the optical systems and the test methods are considered. Recommendations are offered for the development of test methods.**

**Key words — metrological support, optical device, test object, control method.**

# Особенности оценки погрешности воспроизведения параметров функционирования ударного волноводного стенда при испытаниях ударостойкости электронных компонентов

А. Ю. Колыванов

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация** – Данная статья содержит информацию о результатах экспериментальных исследований, направленных на выявление закономерностей, которые могут быть применены при проектировании испытательных ударных стендов на основе стержня Гопкинсона, либо при составлении методик испытаний специзделий на стендах подобной конструкции. В статье описан процесс выявления источников погрешностей, возникающих при воспроизведении стендом заданного ударного ускорения, а также при работе системы, позволяющей его измерить без дополнительного воздействия на испытуемый объект. Также оценивается целесообразность применения данной измерительной системы и ее необходимость при проведении испытаний.

**Ключевые слова** – ударный стенд, волновод, погрешность, испытания.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, в связи с возникновением задач импортозамещения, в том числе и в области микроэлектроники, актуальна задача проведения испытаний электронных компонентов специзделий на устойчивость к воздействию различных внешних факторов, в том числе и на ударостойкость в диапазоне ударных ускорений

$10^5$ - $10^6$  м/с<sup>2</sup>. При оценке ударостойкости, немаловажную роль играет определение свойств объекта по реакции его на ударное воздействие. Проведение подобных испытаний электронных компонентов возможно с применением волноводных ударных стендов, позволяющих не только произвести нагружение объекта, но и проконтролировать этот процесс.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для определения свойств испытуемого объекта по его реакции на ударное нагружение, необходимо точно знать характеристики воспроизводимого стендом импульса ударного ускорения. С этой целью могут быть применены два способа:

- предварительная градуировка стенда и воспроизведение им ускорения без дополнительного измерения,
- измерение ускорения непосредственно в процессе его воспроизведения.

Принципиальная схема волноводного ударного стенда (ВУС) с комплексом измерительной аппаратуры, использующей оба способа представлена на рисунке 1.

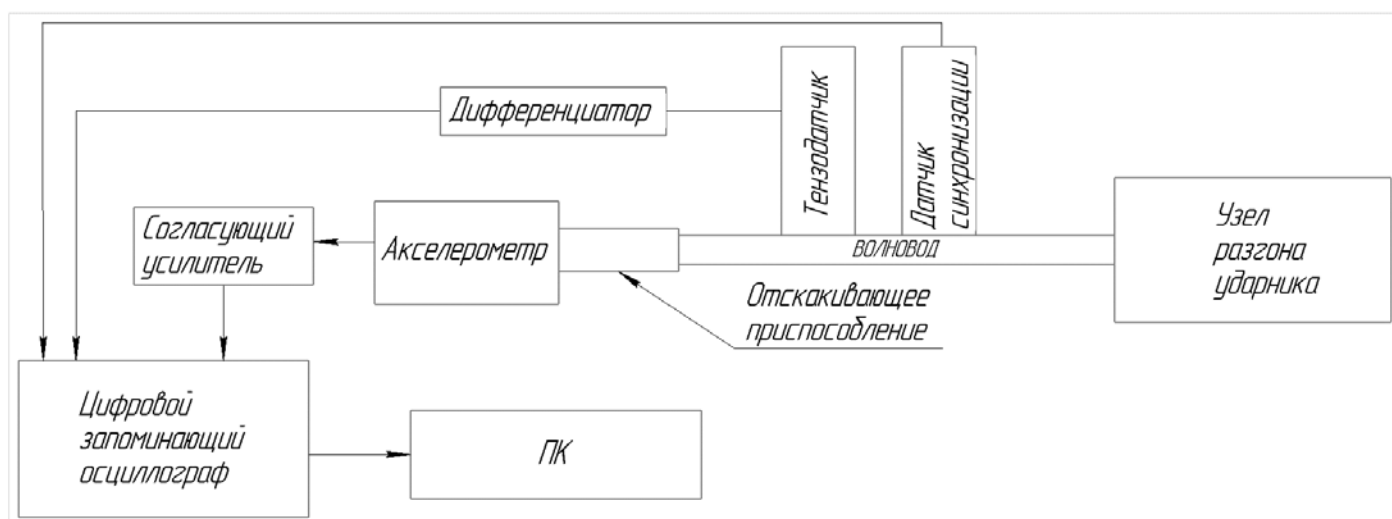


Рис. 1 – Принципиальная схема стенда

Для градуировки ВУС чаще всего применяются пьезоэлектрические акселерометры [1]. В ходе градуировки устанавливается соответствие между давлением в разгонном устройстве ударника и пиковым значением ударного ускорения. Также при этом определяется погрешность воспроизведения стендом ускорения (с учетом погрешности измерения [2]).

Измерение ускорения непосредственно в процессе нагружения позволяет исключить погрешность стенда. Но измерение пьезоэлектрическими акселерометрами часто невозможно, так как испытуемый объект может занимать всю площадь торца волновода, а закрепление акселерометра непосредственно на испытуемом объекте может искажать его реакцию на инерционное нагружение. Измерение ускорения возможно оптическими методами, но требует сложного и дорогостоящего оборудования.

Также воспроизводимое стендом ускорение может быть вычислено, основываясь на измерении параметров волны, сформированной в волноводе. С этой целью в составе установки применен полупроводниковый тензорезистор, закрепленный на волноводе при помощи клея на основе цианакрилата. Преобразование его сигнала происходит в реальном времени при помощи аналогового дифференциатора, построенного на операционном усилителе. Это позволяет получать на экране осциллографа изображение сигнала, пропорционального ускорению, воспроизводимому на торце волновода.

Для определения применимости данного способа, необходимо оценить его точность.

Среднеквадратическое отклонение результата измерений, производимых с применением системы из дифференциатора и осциллографа АКПП-4115/2А составляет 1 %. Данное значение получено экспериментально, при подаче в измерительную цепь импульсов, имитирующих сигнал тензодатчика при прохождении волны по волноводу, генератором сигналов специальной формы. Систематические погрешности, вносимые свойствами клевого соединения волновода и тензодатчика, а также отклонениями чувствительности тензодатчика от номинальной, могут быть исключены проведением статической градуировки тензодатчика после его установки. Для этого, волновод с уже установленным тензодатчиком статически нагружается (целиком, либо на определенном участке) определенной силой, действующей на сжатие. Далее вычисляется напряжение деформации, возникающее при этом в волноводе, и определяется его соответствие сопротивлению тензодатчика.

Отдельного внимания заслуживает необходимость точного задания исходных данных для расчета пикового значения ускорения по данным осциллограммы сигнала на выходе дифференциатора. Особо важна точная оценка массы испытуемого объекта, так как ошибка ее измерения создает систематическую погрешность результата. Отклонение массы на 1 грамм вызывает отклонение результата на 0,1 %. Данная величина получена нахождением частной производной по массе испытуемого объекта от функ-

ции, используемой для расчета ускорения по осциллограмме сигнала на выходе дифференциатора.

Также на результат влияет точность задания таких параметров стенда, как геометрические размеры волновода, измеряемые микрометрами и штангенциркулями, и свойства его материала (модуль упругости, скорость звука, плотность), являющиеся табличными данными, но они оказывают на результат измерений значительно меньшее влияние, чем отклонения массы испытуемого объекта, при имеющейся точности их задания.

Погрешность воспроизведения стендом ускорения формируется из следующих составляющих:

- погрешность задания давления в разгонном устройстве;
- погрешности, вызываемые непостоянством силы трения при разгоне ударника;
- погрешности, вызываемые непостоянством потерь импульса при передаче между элементами стенда (ударником, гидронасадкой, волноводом и отскакивающей частью).

Давление в разгонном устройстве задается оператором установки вручную. Абсолютная погрешность задания давления составляет  $\pm 0,005 \text{ кг/см}^2$ , что соответствует половине цены деления манометра.

Источником наиболее значительной составляющей погрешности является нестабильность процесса разгона ударника при низких давлениях (до  $0,8 \text{ кг/см}^2$ ), связанная с недостаточным для достижения равномерного разгона ударника проходным сечением клапана. Из-за недостаточного потока воздуха, скольжение ударника по смазке в стволе происходит неравномерно. С повышением давления процесс разгона ударника сжатым воздухом приближается к модели адиабатического расширения газа в разгонном устройстве, построенной с учетом постоянной силы трения ударника о стенки ствола. Измерение скорости ударника в конце разгона производилось при помощи двух фотоэлементов, сигнал которых регистрировался запоминающим осциллографом. Ударник, перемещаясь, последовательно перекрывает свет от светодиодов, попадающий на фотоэлементы, а осциллограф регистрирует разницу по времени. Относительное среднеквадратическое отклонение скорости ударника, при давлении  $0,6 \text{ кг/см}^2$ , составляет 5,9 %. При повышении давления до  $1,6 \text{ кг/см}^2$  относительное среднеквадратическое отклонение скорости ударника снижается до 1,2 %.

Также следует учитывать, что коэффициент трения ударника о стенки ствола зависит от количества и свойств залитого в ствол масла, и может иметь разницу значений до и после технического обслуживания стенда до 20 % (результат получен исходя из измерений скорости при залитом в ствол масле, и при полном его израсходовании).

При передаче импульса от ударника в волновод через гидронасадку, обеспечивающую формирование импульса, а также предотвращающую пластическую деформацию

торца волновода, происходят потери энергии на деформации корпуса и уплотнителей гидронасадки, и трение между наковальней и ударником. При обработке результатов эксперимента, непостоянство данных потерь выражается в разнице между разбросом значений скорости ударника, и ускорения, измеренного тензодатчиком с дифференциатором. При этом, по мере повышения давления в разгонном устройстве, данная разница снижается.

Потери энергии при передаче импульса из волновода в отскакивающую часть оказались неизмеримо малы. Это было определено при помощи установки с разрезным стержнем Гопкинсона. В разрыв волновода в ней не помещалось никакого образца, и исследовалась исключительно передача импульса через стык двух стержней. Прохождение волны деформации по волноводом контролировалось тензодатчиками.

При многократном воспроизведении стендом импульсов ускорения при различных давлениях (10 раз при каждом давлении от 0,6 до 1,6 кг/см<sup>2</sup>, с шагом 0,2 кг/см<sup>2</sup>) производились замеры пикового значения ускорения. Относительное среднеквадратическое отклонение пикового значения ускорения достигает при давлении 0,6 кг/см<sup>2</sup> значения 8 % при его измерении тензодатчиком с дифференциатором, и 10 % при измерении акселерометром АП-15. Полученные зависимости приведены на рисунке 2. При больших давлениях в разгонном устройстве относительное среднеквадратическое отклонение не превышает 5 %, а к давлению 1,6 кг/см<sup>2</sup> снижается до 1 %.

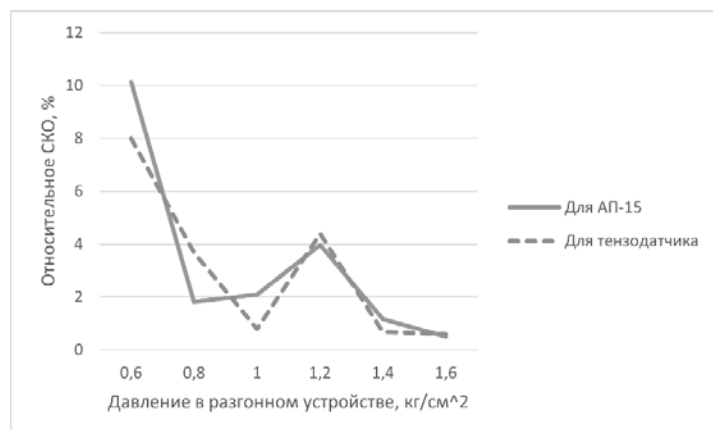


Рис. 2 – Зависимость относительного СКО воспроизводимого пикового ускорения от давления в разгонном устройстве

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что при воспроизведении ускорений в нижней части рабочего диапазона ВУС возникает значительный разброс пиковых значений воспроизводимого ускорения. Основным источником погрешности при этом является непостоянство силы трения ударника при разгоне по стволу. В этой части диапазона, система на основе тензодатчика и дифференциато-

ра, созданная для контроля воспроизводимого ударного импульса, позволяет существенно повысить точность оценки реакции испытуемого объекта на ударное воздействие, по сравнению с использованием заранее измеренных данных воспроизводимого импульса.

В верхней части рабочего диапазона ускорений ВУС нет необходимости дополнительного контроля параметров ударного импульса, так как разброс пиковых значений ускорения снижается.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пеллинец В. С. Измерение ударных ускорений, М., Изд-во стандартов, 1975, 288 с.
- [2] Методика оценивания погрешности результата измерений пикового ударного ускорения МИ 107—76
- [3] Жаркой М.Ф. Пневматический узел разгона бойка волноводного ударного стенда / А. Ю. Кольванов, М. Ф. Жаркой // Инновационные технологии и технические средства специального назначения. Труды XI общероссийской научно-практической конференции в 2 томах. Том 2. "Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ», 2020.
- [4] Кольванов А. Ю. О возможности повышения стабильности воспроизведения ударных импульсов волноводным ударным стендом / А. Ю. Кольванов, М. Ф. Жаркой // МОЛОДЕЖЬ. ТЕХНИКА. КОСМОС. Статьи и доклады X Общероссийской молодежной научно-технической конференции. Сер. "Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»", 2020.
- [5] Кольванова А.Ю. Способ измерения ударного ускорения, воспроизводимого волноводным ударным стендом, при помощи тензодатчика / Фундаментальные основы баллистического проектирования: VIII Всероссийская научно-техническая конференция. - СПб: Изд-во БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 2022. – С. 75.
- [6] Ионов В.Н. Прочность пространственных элементов конструкций: Учеб. Пособие. Динамика и волны напряжений – 2-е изд., перераб. и доп / В.Н. Ионов, П.М.Огибалов. – М.: Высшая школа, 1980. – 440 с.
- [7] Манжосов В.К., Слепухин В.В. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры - Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 208 с.

**Abstract** – This article contains information about the results of experimental studies aimed at identifying regularities that can be applied in the design of shock test machines based on the Hopkinson pressure bar, or in the preparation of test procedures for special products on machines of a similar design. The article describes the process of identifying sources of errors that occur when the machine reproduces a given value of shock acceleration, as well as during the operation of a system that allows it to be measured without additional impact on the test object. The expediency of using this measuring system and its necessity during testing are also evaluated.

**Key words** – shock stand, waveguide, error, testing.

# К вопросу разработки методики контроля работоспособности секстанов СНО-Т

Р. Н. Целмс, Н. Н. Скориантов

Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[tselms\\_rn@pochta.tvoe.tv](mailto:tselms_rn@pochta.tvoe.tv), [skorintex@yandex.ru](mailto:skorintex@yandex.ru)

В. Г. Агафонов

Главное управление инновационного развития МО РФ  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация** — Предлагается методика выполнения измерений для проверки работоспособности секстанов, которая за счёт введения новых конструкторских и технологических решений, а также корректировки расчёта погрешностей измерений позволяет избежать выпуска некачественной продукции, увеличивает производительность труда и снижает расходы предприятия на переделку брака и судебные издержки по рекламациям заказчика.

**Ключевые слова** — метрологическое обеспечение, методики измерений, секстан, калибровка

При эксплуатации современного навигационного оборудования особое внимание уделяется сохранению его метрологических характеристик, особенно при возникновении внештатных аварийных ситуаций. Широкое распространение в судостроении и морской навигации получило использование навигационного секстана, который является уникальной и незаменимой разработкой. При возникновении внештатной ситуации на корабле он может стать единственным средством к спасению экипажа судна в суровых условиях крайнего севера или в жарких тропиках. Разработка новой методики определения его метрологических характеристик является актуальной задачей, поскольку позволяет повысить достоверность результатов измерений с помощью этого прибора.

Рассматриваемый в работе секстан навигационный с осветителем СНО-Т (рис.1) предназначен для измерения высот небесных светил в море или на берегу и углов между видимыми наземными объектами с целью определения координат наблюдателя и может эксплуатироваться на судах неограниченного района плавания.

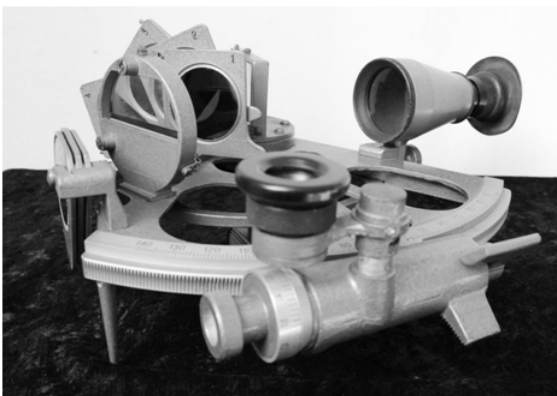


Рис. 1- Навигационный секстан СНО-Т

Главная особенность секстанта, которая позволила ему вытеснить астролябию, состоит в том, что при его исполь-

зовании высота светила измеряется относительно горизонта, а не относительно самого инструмента, что позволяет получить высокую точность определения координат местонахождения судна.

В связи с обширным внедрением системы менеджмента качества на предприятиях, возросло число рекламаций заказчиков на секстаны. До последнего времени приходилось мириться с тем, что приборы возвращались на завод-изготовитель по рекламациям заказчика. Статистический анализ показал, что в среднем брак составлял 75 % (рис.2).

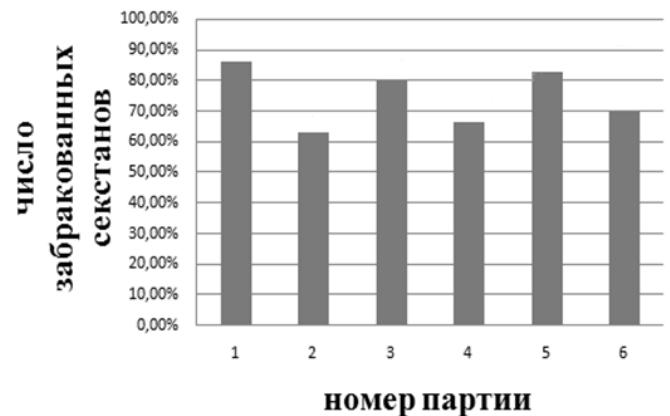


Рис. 2 – Гистограмма бракованных секстанов СНО-Т в партии до устранения выявленных несоответствий

Это означало, что изготовитель фактически выпускал бракованные изделия, и влекло за собой повышение себестоимости изделия на устранение неисправностей и судебные издержки по рекламациям. Для выявления причин признания при выпуске негодной продукции, как годной, было принято решение провести повторно метрологическую экспертизу конструкторской и технологической документации [1]. При этом были выявлены ошибочные и недостаточно обоснованные решения, связанные с установкой секстана СНО-Т на калибровочное средство измерения и обработкой результатов измерений [2,3]. Устранение выявленных недостатков было возможно только при внесении изменений в существующую инструкцию для проведения ежегодной проверки секстанов, которая включала и методику выполнения измерений. Поэтому вместо нее в соответствии с ГОСТ 8.563-2009 и ГОСТ 8.736-2011 была разработана новая методика выполнения измерений для секстана СНО-Т. Она включает два аспекта: установка секстана и проведение измерений с последующей обработкой результатов.

Технология установки секстана, т.е. подготовки его для проведения измерений, включает следующие позиции (рис.3...5).

В предложенном варианте подготовительный этап включает дополнительно устанавливаемое на центральную площадку гониометра приспособление Ф5.082.039-01 (рис. 3).

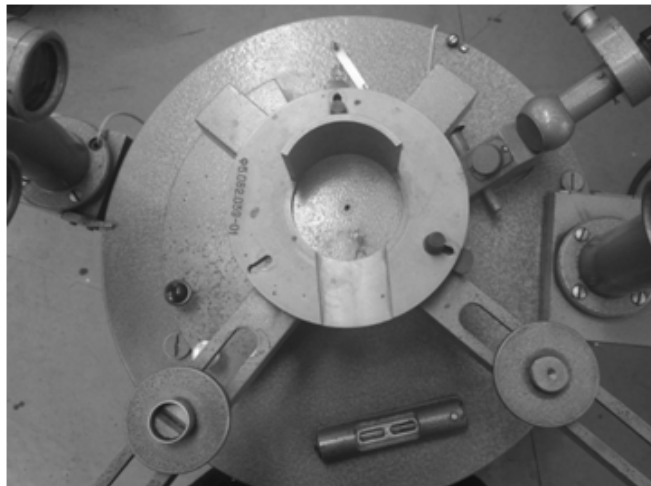


Рис. 3 – Подготовка установки секстана на гониометр

#### I. КРЕПЛЕНИЕ СЕКСТАНА

Предусмотрено дополнительное крепление (рис.4) опорных чашек гониометра с помощью стопорных гаек и винтов.

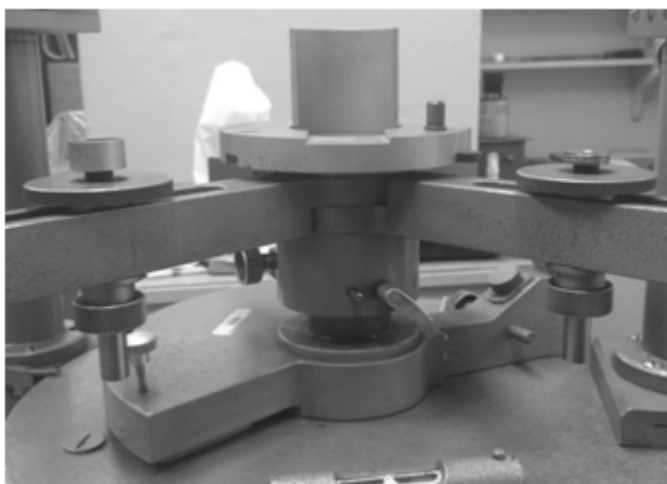


Рис. 4 – Стопорные гайки и винты

Путем перемещения опорных чашек (рис. 5) вдоль консолей секстан устанавливается таким образом, чтобы он был прижат к опорной цилиндрической стенке приспособления Ф5.082.039-01.

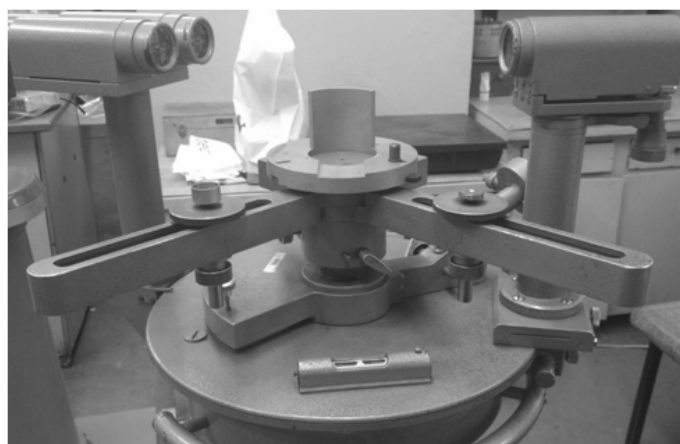


Рис. 5 – Консоли и опорные чашки гониометра

#### II. НАСТРОЙКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ (РИС.6)

Настройка осуществляется с помощью коллиматора, большое зеркало которого устанавливается напротив основного коллиматора, а малое - напротив вспомогательного коллиматора.

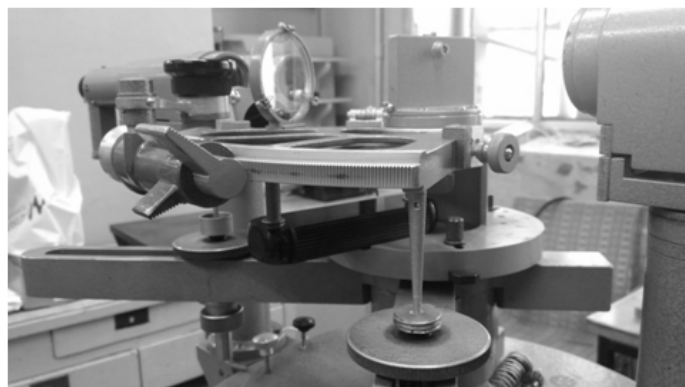


Рис. 6 – Установленный секстан с опорой в трёх точках

Такое конструкторское и технологическое решение (с опорой в трех точках) для подготовки секстана к измерениям обеспечило повышение точности и сходимости результатов измерений, т.е. повышение качества измерений.

Необходимость внесения изменений в части обработки результатов измерений вызвана несколькими причинами.

При проведении повторной метрологической экспертизы нормативной документации на секстан СНО-Т и анализа ГОСТ 8.563-2009 и ГОСТ 8.736-2011 были выявлены неточности расчета вводимой поправки, учёта некоторых коэффициентов, отсутствие расчета погрешности обратного хода и др., что приводило к завышению доверительного интервала.

#### III. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определяется вариация мёртвого хода между червяком и рамой секстана

Для этого необходимо вычислить среднее арифметическое значение отсчётов при прямом и обратном вращении барабана секстана по формуле:

$$a_{icp} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 a_{ij} \text{ и } b_{icp} = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 b_{ij},$$

где  $i$  – изменяемый в диапазоне от  $0^\circ$  до  $140^\circ$  угол, на котором производится измерение;

$j$  – порядковый номер измерения для каждого угла.

Вычисление значения вариации мёртвого хода на указанных положениях угла проводится по формуле:

$$MX_i = \frac{b_{icp} - a_{icp}}{2}$$

Далее вычисляется среднее значение вариации мёртвого хода между червяком и рамой секстана по формуле

$$MX = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 MX_i$$

2. Рассчитывается оценка математического ожидания измеряемой величины, за которую принимают среднее арифметическое значение исправленных результатов измерений при прямом и обратном ходе, и среднеквадратического отклонение [4].

Далее рассчитывается абсолютная погрешность для заданной доверительной вероятности для прямого и обратного хода вращения барабана по формуле:

$$\Delta x = S_x t$$

где,  $\Delta x$  - абсолютная погрешность прямого (обратного) хода вращения барабана для заданной доверительной вероятности;  $S_x$  - среднеквадратическая отклонение;  $t$  - коэффициент Стьюдента.

Число степеней свободы для определения коэффициента Стьюдента равно:

$$f = n - 1$$

где  $n$  – число результатов измерений.

В нашем случае число степеней свободы  $f = 5$ , тогда коэффициент Стьюдента по таблице  $t = 2,776$ .

3. Затем определяется поправка индекса, как среднее значение абсолютных погрешностей прямого и обратного хода:

$$Q_{cp} = \frac{\Delta x_{np} + \Delta x_{обр}}{2}$$

Полученные результаты вносятся в «Карту измерений погрешности секстана».

Если абсолютная величина поправки  $Q_{cp}$  не превышает установленного граничного значения  $6''$ , то ею можно пренебречь, и в таблицу «Карта измерений погрешностей секстана» записать  $Q_{cp} = 0$ . В противном случае следует учитывать полученную поправку.

Поправка индекса на промежуточные отсчёты в диапазоне от  $0^\circ$  до  $15^\circ$  определяется линейной интерполяцией. Таким образом, новая методика расчёта погрешностей позволила сузить доверительный интервал.

После введения разработанной методики измерений на навигационные секстаны СНО-Т резко сократилось число рекламаций на изделие. Средний процент забракованных изделий понизился с 75 % до 5 % (рис.7).

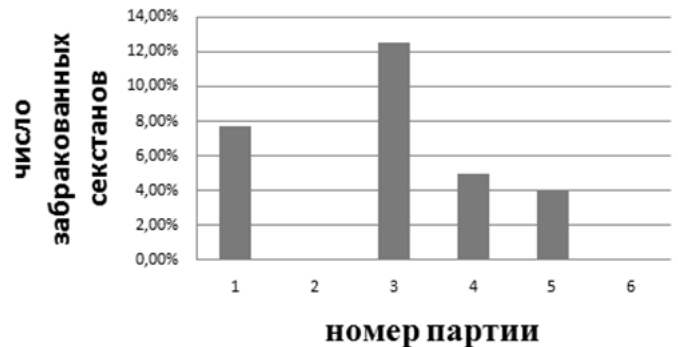


Рис. 7 – Гистограмма забракованных секстанов СНО-Т в партии после устранения выявленных несоответствий

Оставшийся процент брака в основном объясняется тем, что в партии изделий, поступающих для настройки, изначально есть неисправные образцы, которые исключаются из процедуры настройки и отправляются на доработку изготовителю.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика выполнения измерений на навигационные секстаны СНО-Т за счет внесения новых конструкторских и технологических решений, а также введения корректировки в расчет погрешности измерений позволила повысить точность измерений и сузить доверительный интервал, что привело к существенному снижению уровня брака изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГОСТ 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. -М.: Стандартинформ, 2013 - 20 с.
- [2] ГОСТ 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Методики (методы) измерений. -М.: Стандартинформ, 2010 – 20 с.
- [3] Несмиян Е.И. Метрологическая экспертиза технической документации – фундамент надежной и долговечной продукции. / Е.И. Несмиян// Главный метролог. 2016. №6. 44-49 с.
- [4] EA-4/02-2013. Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration.: Paris, 2013. 75 p.

**Abstract** — The method of performing measurements to check the operability of sections is proposed, which, due to the introduction of new design and technological solutions, as well as adjustments to the calculation of measurement errors, avoids the release of low-quality products, increases labor productivity and reduces the costs of the enterprise for the alteration of defects and legal costs for customer complaints.

**Key words** — metrological support, measurement methods, sextant, calibration.

# Метрологическое обеспечение систем вибрационного мониторинга для оценки технического состояния роторного оборудования

Р. Н. Целмс, Н. Н. Скориантов  
Санкт-Петербургский государствен-  
ный университет аэрокосмического  
приборостроения  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[tselms\\_rn@pochta.tvoe.tv](mailto:tselms_rn@pochta.tvoe.tv),  
[skorintex@yandex.ru](mailto:skorintex@yandex.ru)

Н. Е. Кочугуров  
АО «Центральное морское  
конструкторское бюро «Алмаз»  
г. Санкт-Петербург, Россия  
[office@almaz-kb.ru](mailto:office@almaz-kb.ru)

В. Г. Агафонов  
Главное управление инновационного  
развития МО РФ  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация** — Рассмотрены преимущества систем вибрационного мониторинга с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов для роторного оборудования. Показаны наиболее вероятные диапазоны частот и величины повышения уровней вибрации механизмов при различных эксплуатационных дефектах. Приведен пример планирования текущего ремонта по анализу диагностических признаков с выводом сообщений экспертной системы поддержки принятия решений. Перечислены нормированные метрологические характеристики измерительных каналов для обеспечения требований нормативной документации к системам вибрационного мониторинга образцов вооружения и военной техники. Представлен интерфейс перспективной системы мониторинга технического состояния корабельного роторного оборудования. Сформулирован вывод о целесообразности внедрения.

**Ключевые слова** — измерительный канал, нормируемые метрологические характеристики, вибрационный мониторинг, измерительная система, выявление эксплуатационных дефектов, погрешности измерений, достоверность диагностики.

Вибрационная диагностика объединила задачи определения и прогноза технического состояния машин и оборудования по их вибрационному состоянию. Вибрационная диагностика проводится на работающих машинах и механизмах, как при эксплуатации так и при установке на стенде. Вибродиагностика — это метод неразрушающего контроля, основанный на анализе комплекса параметров вибрации для определения состояния оборудования [1,2]. Системы вибрационного мониторинга измерительной техники (далее - СВМИТ) - комплексы и системы контроля, диагностирования и прогнозирования, основанные на обработке сигналов вибрации.

СВМИТ предназначены для определения технического состояния узлов и агрегатов роторного оборудования. Они позволяют осуществлять контроль над техническим состоянием практически любых узлов роторного типа: подшипников качения и скольжения, зубчатых и механических передач, электромагнитных систем машин постоянного и переменного тока, рабочих колес компрессоров, турбин, насосов и вентиляторов, муфтовых соединений в процессе технической эксплуатации. Таким образом, они позволяют обеспечить обнаружение всех основных дефектов на этапе зарождения, наблюдение за развитием обнаруженных

дефектов и долгосрочный прогноз технического состояния узлов этого оборудования

Система диагностики строится по модульному принципу. Существует несколько уровней системы: от простейшей переносной системы мониторинга до многоканальной стационарной системы мониторинга. Диагностика проводится с разным количеством датчиков различных величин (от 1 до нескольких сотен), которые устанавливаются на контролируемом оборудовании. На рис.1 представлена обобщенная структура стационарной системы. Все элементы системы устанавливаются на объекте диагностики стационарно и работают непрерывно. Число датчиков на один сборщик данных - до 16, дополнительно — один датчик оборотов, периодичность измерений при мониторинге — несколько минут.

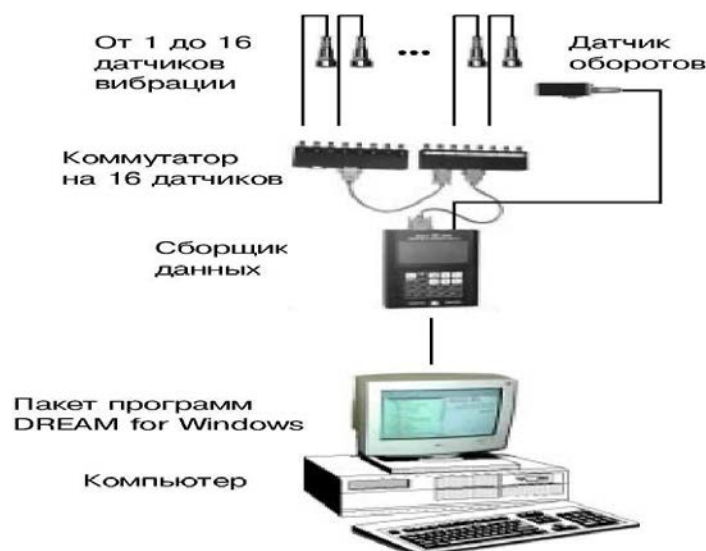


Рис. 1 – Обобщенная структура стационарной системы вибродиагностики.

Одним из важнейших элементов в СВМИТ являются датчики вибрации. Современные типовые датчики (рис.2) имеют разный принцип работы (микромеханический, пьезоэлектрический, оптический) и чаще всего используются для определения: виброскорости, виброускорения, виброперемещения [3].



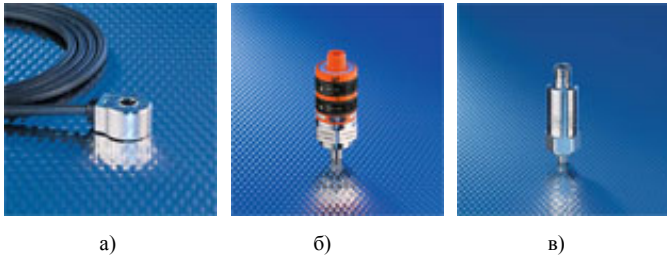


Рис. 2 – Типовые датчики вибрации IFM Electronic: а)- для подключения к внешним блокам электроники VSE; б)- серия VK; в)- серия VT

Данная работа является результатом исследований, которые проводились на базе корабельного оборудования. Роторный механизм устанавливается стационарно на 4 вибродатчика, в качестве которых используются пьезоэлектрические виброметры. Схема пьезоэлектрического виброметра и принцип его работы хорошо известны. Это преобразование вибрации в электрический сигнал. Электрический сигнал с пьезокристалла, как правило, подаётся на аналогово-цифровой преобразователь, и его обработка осуществляется в цифровом виде.

К основным недостаткам этого класса приборов относятся:

- необходимость соприкосновения чувствительной части с измеряемым объектом (это не всегда уместно в условиях производства);
- пьезоэлектрические приборы по сравнению с другими имеют, как правило, более узкий диапазон воспринимаемых частот, поскольку имеют механический тракт передачи вибрации, где максимальная частота определяется инертностью компонентов.

К достоинствам пьезоэлектрических виброметров можно отнести их относительно невысокую стоимость, а также относительно простое устройство, что обеспечивает надёжность и устойчивость к внешним воздействиям, что особенно важно при технической эксплуатации вооружения и военной техники (далее - ВиВТ).

Практически все группы дефектов роторного оборудования обнаруживаются на начальной стадии развития по низкочастотной и высокочастотной вибрации подшипников зубчатой передачи. Основными видами анализа сигналов является частотный и спектральный. И в том, и в другом случае предусмотрено определение характеристик компонент сигнала на разных частотах.

На рис.3 представлены наиболее вероятные диапазоны частот и величины повышения уровней вибрации механизмов при различных эксплуатационных дефектах [1].

По росту низкочастотной вибрации ротора в подшипниках и, как следствие, вибрации машины в целом, диагностируются:

- 1- дефекты роторов,
- 3 - дефекты рабочих колес в целом (неуравновешенность, бой, перекос и т.п.);
- 5 - Ряд дефектов ротора, приводят к росту динамических нагрузок на подшипники, которые приводят к высокочастотной вибрации.

По росту высокочастотной вибрации:

6 - обнаруживаются дефекты рабочих колес и задевающие вращающимися узлами за неподвижные части машины (нарушение смазки).

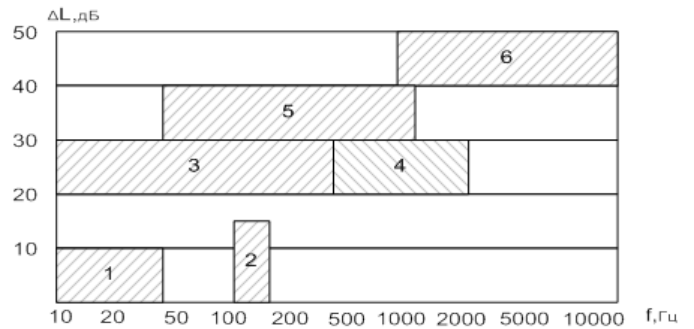


Рис.3 – Диапазоны частот и величины повышения уровней вибрации механизмов при различных эксплуатационных дефектах: 1 - дисбаланс ротора; 2 - асимметрия вращающегося магнитного поля; 3 - дефекты насосов и вентиляторов, несоосность валов; 4 - волнистость дорожек подшипника; 5 - разрушение подшипников; 6 - нарушение смазки подшипников, кавитация

Нормативными документами [4,5] определены допустимые эксплуатационные нормы вибрации механизмов с вращательным движением и порядок их измерений. Однако контроль по стандартизованным критериям дает только обобщенную картину технического состояния механизма, а вместе с тем углубленный и разноплановый анализ вибраций позволяет решать задачи оценки технического состояния, диагностики и прогнозирования, выявлять зарождающиеся дефекты за значительное время до того момента, когда ремонт становится неизбежным. Алгоритм мониторинга включает в себя периодический контроль выбираемых пользователем параметров различных видов сигналов, и, прежде всего, сигнала вибрации; сравнение этих параметров с пороговыми значениями (эталоны); определение основных тенденций развития контролируемых параметров [6].

К перспективным системам мониторинга технического состояния предъявляются специальные требования, обусловленные высокими требованиями к ВиВТ [7], стойкостью к воздействию внешних факторов естественного и искусственного происхождения (вибрационная стойкость, воздействие высоких и низких температур, ударостойкость и другие).

Высокая степень достоверности получаемых результатов при прогнозировании отказов работающих машин и механизмов может быть реализована только при метрологическом обеспечении ИС.

Метрологические свойства военной измерительной техники, определяемые ее метрологическими характеристиками, оказывают влияние на погрешность результата измерений. По ним можно судить о ее пригодности к применению в определенных условиях. Для измерительных систем согласно ГОСТ Р 8.596-2002 «Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения» измерительная система (ИС) устанавливают комплекс нормируемых метрологических характеристик (ГОСТ 34.201, ГОСТ 34.601, ГОСТ 34.602). К ним относят:

- номинальную характеристику преобразования (для измерительных преобразователей), цену деления шкалы и ее пределы;

- выходной код, число разрядов кода, номинальную цену единицы наименьшего разряда кода (для цифровой измерительной техники);
- систематическую составляющую погрешности;
- случайную составляющую погрешности;
- общую погрешность;
- выходное и входное сопротивление;
- динамические характеристики;
- функции влияния.

ИС являются разновидностью средств измерений и на них распространяются все общие требования к средствам измерений. Нормы на метрологические характеристики измерительных каналов устанавливаются в соответствии с ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений» и с учетом МИ 2439-97 для каждого измерительного канала ИС, при необходимости для комплексных и измерительных компонентов ИС, т.е. первичных преобразователей (датчиков вибрации, импедансных головок и т.п.) при выпуске из производства и в эксплуатации [8].

Метрологическое обеспечение ИС [9] включает в себя следующие виды деятельности:

- нормирование, расчет метрологических характеристик измерительных каналов ИС;
- метрологическая экспертиза технической документации на ИС;
- испытания ИС с целью утверждения типа; утверждение типа ИС и испытания на соответствие утвержденному типу;
- сертификация ИС;
- поверка и калибровка ИС;
- метрологический надзор за выпуском, монтажом, наладкой, состоянием и применением ИС.

Нормирование метрологических характеристик ИС является одним из основных элементов системы метрологического обеспечения на этапе проектирования. Нормированные метрологические характеристики измерительных каналов должны обеспечивать:

- расчет характеристик погрешности измерений, выполняемых посредством измерительного канала в рабочих условиях эксплуатации;
- контроль при испытаниях и поверке ИС на соответствие нормированным метрологическим характеристикам измерительного канала ИС.

Интерфейс перспективной системы мониторинга технического состояния корабельного роторного оборудования с возможностью установления нормируемых метрологических характеристик измерительных каналов для оценивания погрешности результата измерений измерительной системы представлен на рис.4.

Приведена зависимость СКО одного из параметров сигнала в заданной полосе частот по 4-м измерительным каналам. Выборка 250000 измерений. Диапазон частот от 0

до 10000 Гц. Анализ характеристик показывает, что все 4 канала дают устойчивый сбой на частоте 1000 Гц. Можно определить вид отказа: 4 – волнистость дорожек подшипника; 5 – разрушение подшипников; 6 – нарушение смазки подшипников, кавитация.



Рис.4 – Интерфейс перспективной СВМИТ с возможностью установления нормируемых метрологических характеристик измерительных каналов

На частоте 500 Гц один из каналов «даёт скачок», что требует дополнительной диагностики для прогнозирования отказа.

Таким образом, выходными данными открытой системы мониторинга являются:

- информация о факте выхода значений контролируемых параметров за установленные пороги;
- наиболее вероятное время достижения ближайшего порога значением контролируемого параметра;
- рекомендуемая дата следующего измерения.

Учитывая вышеизложенное, очевидно, что применение виброконтроля позволяет перейти с обслуживания по наработке к обслуживанию роторного оборудования по фактическому техническому состоянию (рис.5).

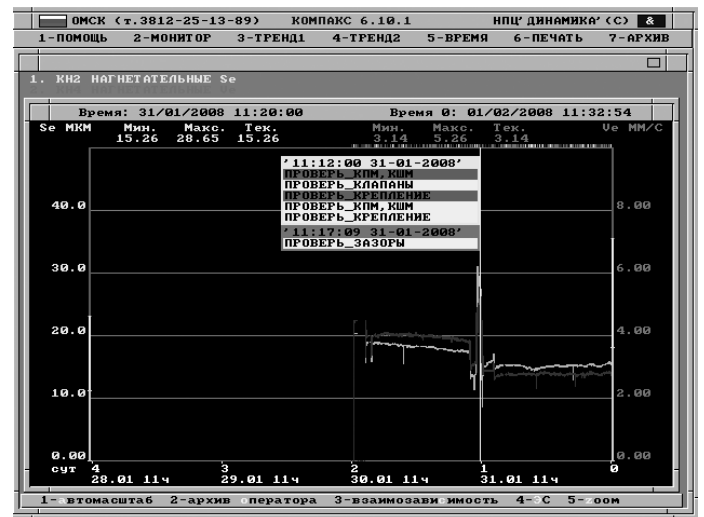


Рис.5 – Пример планирования текущего ремонта по анализу диагностических признаков с выводом сообщений экспертной системы поддержки принятия решений

В процессе работы комплекса накапливаются большие объемы данных (за сутки до 20 Мб). Они записываются в файлы. Имена файлов формируются так, что по ним можно определить точку и направление контроля, дату создания.

На основании полученной информации, можно оптимизировать планирование текущего и капитального ремонта, увеличить межремонтный интервал, уменьшить затраты на закупку запчастей и расходных материалов.

Вибродиагностическое обследование позволяет:

– комплексно оценивать техническое состояние роторного оборудования;

– выявлять явно выраженные (дисбаланс, расцентровка, недостаточная жесткость опор) и зарождающиеся дефекты оборудования (дефекты подшипников, шестерен и т.п.) (рис. 3);

– оценивать состояние любых подшипников (качения, скольжения), передаточных механизмов (зубчатых, ременных и цепных) и нагнетающего оборудования (насосы, компрессоры, вентиляторы);

– выявлять дефекты электромагнитных систем электрических машин;

– планировать объемы и сроки ремонтных работ, оценивать качество их выполнения.

– повысить надежность роторного оборудования;

– выявить и предупредить отказы и неисправности;

– определить состояние оборудования.

Реализация мониторинга диагностического параметра с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов в отношении роторного энергетического оборудования позволяет с высокой степенью достоверности определить его остаточный ресурс и срок службы и, либо рекомендовать провести очередную кампанию энергетических установок без каких-либо существенных операций восстановительного характера, либо провести необходимые техническое обслуживание и ремонт.

Внедрение системы вибрационного мониторинга с нормированными метрологическими характеристиками измерительных каналов позволило сократить расходы на ремонт энерготехники примерно в два раза при одновременном увеличении межремонтного периода эксплуатации на 35 %, перейти с обслуживания по наработке к обслуживанию по фактическому техническому состоянию.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Скориантов Н.Н., Мишура Т.П., Парфенова В.С. Метрологическое обеспечение систем вибрационного мониторинга измерительной техники. Журнал: Морские интеллектуальные технологии №3, Т.1, 2014, 6 с.
- [2] ГОСТ 20911-89. «Техническая диагностика. Основные термины и определения».
- [3] ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч.1. Общие требования.

[4] ГОСТ ИСО 2954-97. Вибрация машин с возвратно - поступательным и вращательным движением. Требования к средствам измерений.

[5] Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф., Соболев Г.Г. Организация и алгоритмы системы вибрационного контроля и оценки технического состояния турбоагрегатов по вибрационным параметрам. Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций: Сб. докл. / под общ. ред. А.В. Салимона.-М.: ОАО "ВТИ", - 2003, с. 25-30.

[6] Дюдин Е.С., Кавецкий Н.А. Метрологическая экспертиза вооружения, военной и специальной техники ВМФ. Учебное пособие для метрологов предприятий и организаций судостроения, 2012, 150 с.

[7] ГОСТ 8.009-84 «Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».

[8] Скориантов Н.Н., Гетьман Р.В. Аспекты создания системы метрологического обеспечения измерительных систем при оценке технического состояния оборудования энергетических установок// Межотраслевая научно-практическая конференция "Военное кораблестроение - 2012". Материалы конференции, СПб., 2012.

**Abstract** — The advantages of vibration monitoring systems with standardized metrological characteristics of measuring channels for rotary equipment are considered. The most probable frequency ranges and magnitudes of increased vibration levels of mechanisms for various operational defects are shown. An example of the planning of routine repairs on the analysis of diagnostic signs with the output of messages of the expert decision support system is given. The normalized metrological characteristics of measuring channels are listed to ensure the requirements of regulatory documentation for vibration monitoring systems of weapons and military equipment samples. The interface of a promising system for monitoring the technical condition of shipboard rotary equipment is presented. The conclusion on the expediency of implementation is formulated.

**Key words** — measuring channel, normalized metrological characteristics, vibration monitoring, measuring system, detection of operational defects, measurement errors, reliability of diagnostics.

# Цифровизация процесса обеспечения производства средствами измерений и контроля

И. Л. Юнаков

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

г. Санкт-Петербург, Россия

E-mail: yunakov\_igor@mail.ru

**Аннотация** — Цифровизация производственных процессов является актуальной задачей на сегодняшний момент. В настоящее время предприятия стремятся производить продукцию с кратчайшими временными сроками и высоким качеством изготовления. Своевременное поступление и обеспечение средствами измерения становится основополагающим фактором при подготовке производства. При добавлении планов и потребностей производства в единый цифровой контур, сокращаются трудовые и материальные издержки, что позволяет выпускать конкурентоспособную продукцию с более высоким качеством и в более короткий срок.

Цель исследования – сокращение производственного цикла изготовления изделия на предприятии за счёт снижения потерь времени на ожидание пополнения складских остатков. При работе в единой информационной среде повышается оперативность получения информации о текущих производственных процессах. Предлагаемые методические рекомендации могут быть использованы при внедрении информационных систем управления производством на наукоемких предприятиях..

**Ключевые слова** — *TechnologiCS, информационная система, цифровизация, складской учёт.*

## I. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях динамично изменяющегося рынка основным фактором успеха предприятия становится его конкурентоспособность и эффективность. Одним из способов снижения трудовых и материальных затрат является применение информационных систем при проектировании, подготовке производства и изготовления продукции. Цифровизация этапов производства позволяет оптимизировать производственные процессы, тем самым сокращая срок выпуска изделий.

Одной из задач, возникающей при внедрении автоматизированной системы управления предприятием, является цифровизация процесса обеспечения производства средствами измерения и контроля.

При внедрении системы на этапе обеспечения средствами измерения производства были выявлены проблемы:

- невозможность узнать применимость средства измерения и контроля в технологических процессах;

- высокая трудоёмкость по отслеживанию аттестации средств измерения и контроля;

- отсутствие информации о конкретном месте хранения средства измерения;

- отсутствие информации о плановых потребностях производства.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Цифровизация производственного процесса осуществляется за счёт внедрения информационных систем на этапах проектирования и изготовления изделий. В данном докладе рассмотрена отечественная система управления полного жизненного цикла изделия TechnologiCS.

Информационная система PLM-класса TechnologiCS (рис. 1) обеспечивает цифровизацию всех производственных процессов на предприятии:

- ведение справочников. Все номенклатурные позиции, участвующие в производственной деятельности, вносятся в единую базу данных;

- управление составом изделия, включающее в себя ведение конструкторских спецификаций для каждой номенклатурной позиции. Спецификации могут входить друг в друга с любым уровнем вложенности, формируя в базе данных древовидный состав изделия;

- разработка технологических процессов, как единичные, так и типовые (групповые), на основании которых можно производить трудовое и материальное нормирование технологий, а также выполнять различного вида технологические расчеты;

- управление складским учётом. Ведение информации о наличии на складах и производственных участках остатка по номенклатурным позициям, а также перемещения между точками учёта;

- формировать производственные спецификации, как номенклатурный план производства, на основании которого строится цикловой график изготовления изделий и планируется загрузка технологического оборудования;

- отслеживать процесс изготовления и сдачи изделия с учетом реальных значений параметров, а также указывать брак продукции по видам и причинам.



Рис. 1 – Структура TechnologiCS

Процесс цифровизации обеспечения производства средствами измерения разделяется на три основных этапа:

- **Разработка технологического процесса.** На данном этапе определяется какими средствами измерения планируется осуществлять контроль требуемых параметров характеристик.

- **Ведение складского учёта.** Определяется наличие на предприятии требуемого количества средств измерения и контроля.

- **Планирование выпуска изделий.** Формируется график выпуска продукции и потребностей инструмента к конкретному времени на конкретном рабочем месте.

### III. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

На каждую номенклатурную позицию в информационной системе разрабатывается электронный технологический процесс (рис. 2).

Технологическое проектирование начинается с разработки маршрутной технологии. На этом этапе определяется последовательность выполнения основных операций и закрепление их за конкретным структурным подразделением (цехом и участком). Далее следует более подробная разработка каждой конкретной технологической операции, где:

- осуществляется выбор инструмента и технологической оснастки;
- описываются основные технологические переходы;
- производится расчет норм времени и установление разряда работ;
- указываются разряд и специальность рабочих.

Затем для каждого цеха и участка разрабатывается операционная технология, содержание которой составляют пооперационные технологические карты. Они содержат указания и параметры выполнения каждой производственной операции.

В индивидуальном и мелкосерийном производствах, а также на предприятиях со сравнительно простой технологией разработка технологических процессов обычно ограничивается разработкой маршрутной технологии. В массовом же и крупносерийном производствах вслед за маршрутной разрабатывается более подробная пооперационная технология.

Технология производства должна обеспечивать повышение производительности труда, требуемое качество изготовления при наиболее низкой себестоимости продукции по сравнению с другими вариантами.

Электронный ТП в системе TechnologiCS является не просто документом или файлом. В первую очередь это структурированное описание процесса изготовления соответствующей детали (узла) с указанием последовательности и места выполнения технологических операций, применяемого оборудования и средств оснащения, необходимых материалов и норм их расхода, трудоемкости. С одной стороны, электронный ТП служит основой для автоматического формирования различных описывающих его документов (комплектов документов), а с другой – для планирования и контроля производственного процесса.

№ для отчета	Класс	Обозначение	Наименование
02221; СП805-Болт клещевой	СЕР		Гайка
1. (201/01) Транспортирование	УЗН		Барaban гайкогонный
2. (201/01) Стрижка	УЗН	H985-024	Заполнить болты в гайкогонный барaban из контейнера.
3. (201/01) Транспортирование	УЗН		Стрелка заплата тары г/л 2т
4. (201/01) Нагревание	УЗН	ИВ-154	Заполнить в гайкогонный барaban дрессинг отливки 0,1 куб. м
5. (201/01) Штатповка обьемки	УЗН		гайкать болты
6. (201/01) Обрезка	УЗН		Выгрузить болты из гайкогонного барабана.
7. (201/01) Салтовка	УЗН		Поддон жидельный
8. (201/02) Резьбокалтал	УЗН		Поддон жидельный
1. Вальт деталь из контейнера	УЗН		Заполнить болты в контейнер
2. Накатать резьбу М22-8	УЗН		Проверить качество обработки. Допускается закаливаемый станку
3. Вальт деталь и уложить в контейнер	УЗН		Контроль рабочей - 20% от партии, индикатор - 1 деталь в 5% от производства
4. Проверить параметры резьбы	УЗН		
5. Шероховатость поверхности	УЗН		
6. Контроль: рабочий, мастер	УЗН		
7. (201/03) Контроль	УЗН		
1. Вальт деталь из контейнера	УЗН		Резьбокалтал
2. Накатать резьбу М22-8	УЗН	A8524	Получившая профессиональной дилерской (1954 - Бу)
3. Вальт деталь и уложить в контейнер	УЗН	711-03600.00-001	Упор для накатки резьбы на болтах
4. Проверить параметры резьбы	УЗН		Электрэнергия
5. Шероховатость поверхности	УЗН	71-004.00.00-02	Вальт деталь из контейнера, уложить между болтами на поддерживающей ножке
6. Контроль: рабочий, мастер	УЗН		Нож поддерживающий М16
7. (201/03) Контроль	УЗН		
1. Вальт деталь из контейнера	УЗН	ИР-111	Накатать резьбу М22-8 на детали, охватить поверхность резьбы. Смазка
2. Накатать резьбу М22-8	УЗН		Резьбокалтал
3. Вальт деталь и уложить в контейнер	УЗН		Кольцо 0211-1086 Бг ГОСТ 17763-72 (М22x2,5 Т1Р)
4. Проверить параметры резьбы	УЗН		Кольцо 0211-1086 Бг ГОСТ 17764-72 (М22x2,5 Т1Р)
5. Шероховатость поверхности	УЗН		Линейка 300 ГОСТ 227-75
6. Контроль: рабочий, мастер	УЗН		Масло сосное "Л" и "З" ГОСТ 610-72
7. (201/03) Контроль	УЗН		Документ использовать вместо основы обработки не индустриальной и
1. Вальт деталь из контейнера	УЗН		Вальт деталь и уложить в контейнер
2. Накатать резьбу М22-8	УЗН		Проверить параметры резьбы и длину резьбовой части.
3. Вальт деталь и уложить в контейнер	УЗН		Кольцо 0211-1086 Бг ГОСТ 17764-72 (М22x2,5 Т1Р)

Рис. 2 – Электронный технологический процесс

При накоплении данных по разработанным технологическим процессам появляется возможность формирования перечня номенклатуры, где используется данное средство измерения (рис. 3). Данные перечни позволяют проанализировать потребность в инструменте ещё до момента запуска изделия в производство.

Обозначение	Наименование	Код	Базовая ед. изм.
ШЦ-Н-400-0,05 ГОСТ 166-89	Штангенциркуль	07047	шт

Номенклатура			
Обозначение	Наименование	Системная версия	
4179.01.21.221	Поршень	Активаторед.1 Версия 1	
4179.01.21.221	Поршень	Активаторед.1 Версия 1	
ФКТП297.41.00.310	Каркас	Активаторед.1 Версия 1	
ФКТП297.41.00.310	Каркас	Активаторед.1 Версия 1	
ФКТП297.42.00.310	Каркас	Активаторед.1 Версия 1	
ФКТП297.42.00.310	Каркас	Активаторед.1 Версия 1	

Рис. 3 – Применяемость инструмента в номенклатуре

На основании электронной структуры изделия и разработанных технологических процессов возможно получить информацию о плановой потребности по средствам измерения до составления графика производства.

#### IV. ВЕДЕНИЕ СКЛАДСКОГО УЧЁТА

На основании номенклатурного справочника ведётся количественный учёт по местам хранения на предприятии. В данном режиме обеспечиваются движения материально-технических средств по структурным подразделениям и между персоналом. Каждая единица средства измерения вносится в базу данных со своим уникальным инвентарным номером и указанием даты последней аттестации и периодичности поверки данной позиции. На рисунке 4 представлен пример заполненных реквизитов в системе TechnologiCS. На основании внесённых значений формируется график поверки инструмента.

Справочник	Обозначение	Наименование
ИН	ШЦ-Н-250-0,05 ГОСТ 166-89	Штангенциркуль
ИН	ШЦ-Н-250-0,05 ГОСТ 166-89	Штангенциркуль
ИН	ШЦ-Н-400-0,05 ГОСТ 166-89	Штангенциркуль

Дата отправки	№ учётной карточки	Остаток	Серийный номер номенклатуры	Единица измерения	Склад	Ячейка
19.04.2019	1	1 000,07000223	шт	Базовая	172	

Рис. 4 – Складская карточка средства измерения

После постановки в информационной системе на баланс средства измерения, возможно осуществить перемещение между структурными подразделениями данной номенклатуры или её выдачи на конкретного работника. Таким образом в режиме реального времени можно отследить где и за каким работником числится конкретная номенклатура.

Для обеспечения постоянного наличия требуемого инструмента для производственных нужд вводится термин – «точка переказа».

Точка переказа - минимальный уровень запасов, по достижении которого формируется заказ на пополнение. Точка переказа зависит от времени реализации потребности, величины заказываемой партии и других параметров.

Использование данного определения оправдано для инструмента, который должен всегда иметься в наличии на складе, в количестве, необходимом для бесперебойного обеспечения производства, которое основывается на данных статистики движения инструмента и статистических оценках использования.

Точка переказа определяется по формуле:

$$T_{\text{пер}} = \frac{P \times T_p}{D_{\text{пер}}} + O_{\text{мин}} \quad (1)$$

где  $T_{\text{пер}}$  - точка переказа;

$P$  - потребность;

$T_p$  – время реализации потребности в инструменте, в днях;

$D_{\text{пер}}$  – количество дней в периоде;

$O_{\text{мин}}$  – минимальный остаток – страховой запас, учитывающий риск срыва поставки и изменения периодической потребности.

Необходимо проводить анализ статистики по расходу инструмента на предмет резкого возрастания. При неизменяющемся количестве выпускаемой продукции резкое возрастание расхода инструмента может свидетельствовать о неправильных режимах работы на оборудовании, некачественном материале, прочем производственном браке.

При варианте, когда производственная программа существенно не изменяется и отсутствует большое количество критериев, влияющих на брак в производстве, подходит ниже описанное решение.

Объем партии, заказываемой каждый раз по достижении точки переказа, может быть рассчитан при помощи формулы оптимального объема заказа:

$$Q_0 = \sqrt{\frac{2 \times C_0 \times D}{C_h}} \quad (2)$$

где  $Q_0$  – оптимальный объем переказа;

$C_0$  — затраты на обработку каждого заказа (транспортировка, таможенное оформление и т.д.);

$C_h$  — затраты на хранение единицы запаса на складе в течение периода;

$D$  — потребность в инструменте на период.

Затраты на хранение определяются следующим образом:

$$C_h = \frac{M \times S}{2} \quad (3)$$

где  $M$  – затраты на содержание единицы запаса, руб./шт.;

$S$  - размер заказа, шт.;

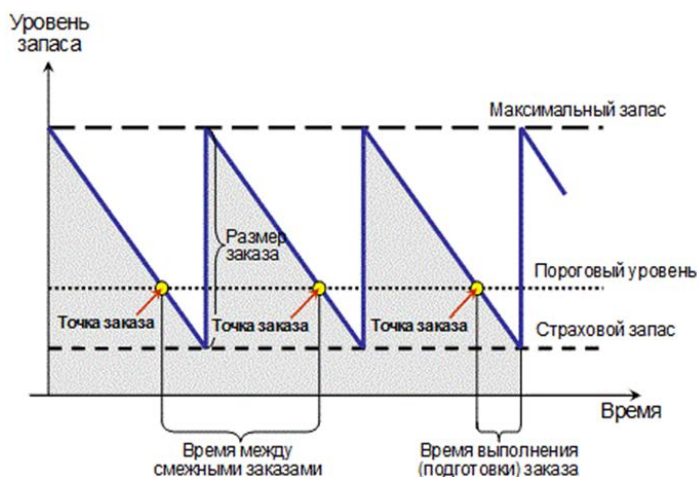


Рис. 5 – График зависимости уровня запаса на складе от времени

Как видно из графика (рис. 5) заказывать инструмент необходимо до наступления точки страхового запаса с учётом времени на создание заявки, её обработки у поставщика и времени доставки инструмента на предприятие. Для каждой номенклатурной позиции точка страхового запаса своя. Она рассчитывается либо исходя из статистических данных, либо на основании производственной программы, в которой учитывается расход инструмента и необходимое его количество для изготовления изделий.

#### V. ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫПУСКА ИЗДЕЛИЙ

На основании электронной структуры изделия и разработанных технологических процессов формируется производственная спецификация.

При запуске производственной спецификации в производство необходимо произвести расчёт времени изготовления с учётом уже задействованного оборудования в других заказах. При стандартном расчёте времени запуска номенклатурных позиций основополагающим фактором является структура состава выпускаемого изделия. На основании технологических норм времени и состава изделия строится график выпуска номенклатурных позиций, где первоочередной задачей является обеспечение комплектующими сборочной единицы верхнего уровня. Основными входными данными являются:

- время подготовительно-заключительное и время штучное;
- график загрузки оборудования; плановая дата выпуска изделия;
- порядок выпуска позиций изделия.

Формируется график выпуска номенклатурных позиций (рис. 6), который в свою очередь раскрывается на последовательность выполнения технологических операций с указанием планового времени запуска операций и времени их выполнения. На основании полученного графика формируется перечень требуемого инструмента к конкретному времени и на конкретное рабочее место. Основная задача производства оснастить данное рабочее место всеми требуемыми потребностями для обеспечения бесперебойного производственного процесса.

Результатом планирования изготовления изделия являются полученные даты запуска и выпуска, календари станков и рабочих. Потребности в материалах и инстру-

ментах присоединяются проекцией на результирующий расчетный производственный календарь, ориентируясь на даты производственных операций. В информационной системе формируются данные: график запуска по датам конкретных номенклатурных позиций; график закупки и обеспечения материалами, комплектующими и инструментами; график загрузки оборудования; график загрузки работников.

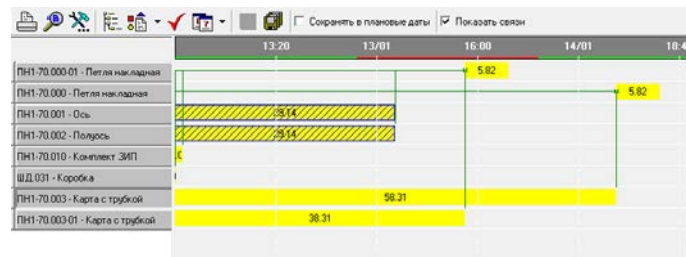


Рис. 6 – Циклограмма изготовления продукции

#### VI. ВЫВОДЫ

Внедрение информационной системы PLM-класса TechnologiCS на предприятии позволяет цифровизовать производственные процессы на этапе обеспечения производства средствами измерения и контроля.

При внедрении системы были решены следующие проблемы:

- невозможность узнать применяемость средства измерения и контроля в технологических процессах. На основании электронных технологических процессов стало возможно формирование перечня применяемости средства измерения;
- высокая трудоёмкость по отслеживанию аттестации средств измерения и контроля. Отчёт по аттестации средств измерения формируется в автоматическом режиме на основании данных, внесённых в систему;
- отсутствие информации о конкретном месте хранения средства измерения. На этапе складского учёта для каждой позиции определяется склад хранения с указанием стеллажа и ячейки, а также работника на которого была выдана данная номенклатура;
- отсутствие информации о плановых потребностях производства. На основании графика производства формируется перечень потребностей к конкретной дате производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] CSoft Программное обеспечение «TechnologiCS V7» Руководство пользователя СИЭС.700000-01 11
- [2] Волкоморов В.И., Марков А.В. Технология роботизированного производства: учебное пособие / БГТУ «ВОЕНМЕХ» – СПб., 2012. 120 с.
- [3] Бабаев С.А., Новокшенов Г.В., Иванов М.В. Разработка инструмента контроля готовности конструкторско-технологической документации к запуску изделия в производство на платформе IT-технологии. Журнал "Радиопромышленность" 04/2017, стр.110-115, 2017г.
- [4] Юнаков И.Л. Особенности производственного учёта в информационной системе TechnologiCS. Сборник по итогам конференции БГТУ «ВОЕНМЕХ» «Старт-2018» - СПб., 2018г. 2с.

- [5] Марков А. В., Шматко А. Д. Коммуникационное интегрирование систем. Учебное пособие для вузов / Балтийский государственный технический университет "Военмех". Санкт-Петербург, 2005.

**Abstract** — Digitalization of production processes is an urgent task at the moment. Currently, enterprises strive to produce products with the shortest possible time and high quality of manufacture. Timely receipt and provision of measuring instruments becomes a fundamental factor in the preparation of production. When adding production plans and needs to a single digital circuit, labor and material costs are reduced, which allows you to produce competitive products with higher quality and in a shorter time. The purpose of the study is to reduce the production cycle of manufacturing products at the enterprise by reducing the loss of time waiting for replenishment of warehouse balances. When working in a unified information environment, the efficiency of obtaining information about current production processes increases. The proposed methodological recommendations can be used in the implementation of production management information systems.

**Key words** — TechnologiCS, information system, digitalization, warehouse accounting.



# Датчики силоизмерительные тензорезисторные на усилия от 10 кН до 3000 кН

И. А. Емельянов, А. Ю. Митин, О. А. Юранев

АО «ЦНИИмаш»

г. Королёв, Московская обл.

E-mail: juranevoa@tsniimash.ru

**Аннотация** — В АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» г. Королёв в 70-ых годах прошлого века были разработаны датчики силоизмерительные тензорезисторные типа ТВ на усилия 1, 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100, 150, 200 и 300 тс. Датчики получились такой удачной конструкции, что до сих пор используются в ЦНИИмаш для проведения испытаний на прочность, прошли испытания в целях утверждения типа и могут быть изготовлены под заказ.

**Ключевые слова** — датчики силоизмерительные тензорезисторные.

Особенностью датчиков типа ТВ (рисунок 1) является наличие двух независимых каналов, один из которых предназначен для подключения к системе измерений, второй - к системе автоматизированного управления нагружением.

10 до 300 тс (от 100 до 3000 тс) представляет собой полый стержень, имеющий на концах внутреннюю и наружную резьбу для присоединения.

Метрологические характеристики датчиков:

- пределы измерений от 10 до 3000 кН;
- предел допускаемой относительной погрешности  $\pm 1 \%$ ;
- диапазон температур работоспособности и хранения от минус 30 °С до плюс 60 °С;
- госреестр СИ № 59073-14 (находится в спецразделе ФИФ ОЕИ).

Датчики изготавливались только для собственных нужд ЦНИИмаш. В 2019 г. поступил заказ от АО «КБСМ» на изготовление датчиков ТВ-25 (на 250 кН) в количестве 16 шт. для работы в условиях морского порта. Заказ был успешно выполнен. АО «ЦНИИмаш» готово и дальше выполнять заказы на поставку датчиков типа ТВ.

**Abstract** — In the JSC "Central Research Institute of Mechanical Engineering" Korolev in the 70s of the last century, force-measuring strain-resistor sensors of the TV type were developed for efforts 1, 3, 5, 10, 15, 25, 50, 100, 150, 200 and 300 ts. The sensors turned out to be such a successful design that they are still used in TsNIMash for strength tests, have been tested for type approval and can be made to order.

**Key words** — force-measuring strain-resistor sensors.

Рисунок 1 – Общий вид датчиков силоизмерительных тензорезисторных

Датчики состоят из упругого элемента, тензорезисторов, соединенных по мостовой схеме, и элементов термокомпенсации и нормирования.

Упругий элемент датчика на номинальное усилие от 1 до 5 тс (от 10 до 50 кН) представляет собой кольцо с диаметрально расположенными местами приложения усилия в виде шпилек с одной стороны и резьбовых втулок с другой. Упругий элемент датчиков с номинальным усилием от

