

На правах рукописи



**Злыгостева Галина Витальевна**

**ПРОЦЕДУРЫ ИСПЫТАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет"

Научный руководитель: **Муравьев Сергей Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Шидловский Станислав Викторович**,  
доктор технических наук, заведующий лабораторией реконфигурируемых высокопроизводительных систем Национального исследовательского Томского государственного университета

**Майстренко Андрей Васильевич**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электронных устройств автоматизации и управления Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

Ведущая организация: **Институт проблем управления**  
им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Защита состоится 18 декабря 2012 г. в 17.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении ВПО "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Национальный исследовательский Томский политехнический университет" по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан 13 ноября 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент  Б.Б. Винокуров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Программное обеспечение является неотъемлемой частью современных технических средств, предназначенных для измерений, контроля и мониторинга сложных и крупных промышленных объектов, включая опасные, коммерческого учета различных ресурсов и др. Под *измерительным программным обеспечением* (ИПО) понимаются программы (совокупность программ) средств измерений, технических систем и устройств с измерительными функциями, реализующие сбор, передачу, обработку, хранение и представление измерительной информации, а также программные модули и компоненты, необходимые для функционирования этих программ.

Программное обеспечение средств измерений, испытаний и контроля, предоставляя возможность выполнения их основных функций, в случае невыявленных ошибок может быть причиной серьезного социального и/или экономического ущерба. Необходимость и сравнительная простота модернизации программного обеспечения, добавление новых функций и расширение измерительных задач могут приводить к изменению характеристик программ и средств измерений (СИ), снижая достоверность результатов. Кроме того, возможна фальсификация результатов измерений и несанкционированный доступ к настройкам программного обеспечения и данным. Таким образом, ИПО влияет на окончательный результат и погрешность измерений и *степень этого влияния должна оцениваться*. Процедура такого оценивания реализуется в форме *испытаний* измерительного программного обеспечения.

Проблеме испытаний ИПО в последние годы уделяется самое серьезное внимание со стороны авторитетных международных метрологических организаций (OIML, WELMEC, COOMET) и национальных метрологических институтов (NPL, PTB, NIST, ВНИИМС, ВНИИМ им. Д.И. Менделеева). Несмотря на наличие нормативных документов по испытаниям ИПО, при разработке документации и проведении испытаний возникают проблемы, связанные с несогласованностью и несовершенством этих документов. Требуют решения задачи практического применения существующих рекомендаций, уточнения процедур испытаний на законодательном уровне, разработки конкретных методик испытаний измерительного программного обеспечения, используемых в различных областях промышленности, и т.д.

Проблема выбора требований и методов испытаний ИПО определяется многообразием технических средств. В результате испытаний должно быть установлено, что измерительное программное обеспечение соответствует требованиям нормативных документов и обладает заявленными характеристиками. Для установления такого соответствия необходимо выбрать процедуру испытаний, определить требования и методы испытаний, разработать программу и методику испытаний, согласующуюся с нормативными документами и учитывающую современные требования, предъявляемые к ИПО.

Тема диссертационной работы разрабатывалась в рамках одного из основных направлений научной деятельности Томского политехнического университета "Методы и технические средства измерения и контроля физических величин на основе новых эффектов и информационных технологий".

**Целью диссертационной работы** является совершенствование методологических основ и разработка практических рекомендаций для проведения испытаний измерительного программного обеспечения различного назначения и областей применения, соответствующих современным требованиям к метрологическому обеспечению средств измерений, испытаний и контроля.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие **задачи исследования**:

- 1 Формирование стратегии испытаний измерительного программного обеспечения на основе анализа нормативной документации и рекомендаций международных организаций по метрологии.
- 2 Построение базовой модели процедуры испытаний измерительного программного обеспечения для систематизации процедур испытаний.
- 3 Разработка типовой программы и методики испытаний (ПМИ) измерительного программного обеспечения и ее практическая апробация.
- 4 Разработка и экспериментальные исследования метода проверки функции ИПО по уменьшению систематической погрешности результатов измерений аппаратно-программных комплексов.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач в работе использованы: методы теории вероятности и математической статистики, методы стандартизации, теоретической и прикладной метрологии. Методы исследований основываются на концепциях процессного подхода и модели взаимодействия открытых систем. Обработка результатов измерений и вычислений выполнена с использованием стандартных программных пакетов MatchCAD и Microsoft Excel. Испытания ИПО и экспериментальные исследования проводились в производственных и лабораторных условиях.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивалась проведением испытаний ИПО и экспериментальных исследований с применением лицензионного ПО и средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку.

#### **Научная новизна работы**

- 1 На основании анализа нормативных документов и экспериментальных исследований предложена базовая концептуальная модель процедуры испытаний, отвечающая современным требованиям к измерительному программному обеспечению.
- 2 Разработана типовая ПМИ измерительного программного обеспечения, включающая основные элементы базовой концептуальной модели и позволяющая значительно сократить время разработки документации на программное обеспечение конкретных средств измерений.

- 3 Предложен и экспериментально исследован метод проверки функции ИПО, реализующей уменьшение систематической погрешности измерительных каналов аппаратно-программных комплексов, основанный на обратном преобразовании и выполнении мультипликативных операций над исходными результатами измерений.

**Практическая ценность работы.** Разработанные в ходе диссертационных исследований базовая концептуальная модель, типовая программа и методика испытаний ИПО успешно апробированы в Государственном центре испытаний средств измерений ФБУ "Томский ЦСМ" при испытаниях встроенного и автономного измерительного программного обеспечения в целях аттестации, сертификации и утверждения типа более 30 средств измерений.

Результаты работы могут найти применение при разработке и испытаниях ИПО измерительных систем на базе интеллектуальных датчиков, контроллеров и других средств со встроенным и автономным ИПО. Такие системы функционируют на производствах с непрерывным технологическим циклом в нефтегазовом комплексе, химии, металлургии, электро- и атомной энергетике, на транспорте. Они могут входить в состав более сложных структур: информационно-измерительных систем, автоматизированных систем управления, контроля, диспетчерского управления, систем коммерческого учета электрической и тепловой энергии, систем диагностики, SCADA и других систем.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Типовая программа и методика испытаний ИПО применяется в ФБУ "Томский ЦСМ" в качестве внутреннего документа системы менеджмента качества – инструкции И 04-10-2010 "Типовая программа и методика испытаний программного обеспечения средств измерений". Результаты диссертационной работы использованы при разработке документации и проведении испытаний ИПО средств измерений и измерительных систем, разработанных предприятиями Томской области: ООО НПП "Томская электронная компания", ЗАО "ЭлеСи", ЗАО "НПФ "МИКРАН", ООО "НПП "Томъаналит", ООО "Конто-Сервис", ООО ТНПВО "СИАМ" и др.

Акты внедрения приложены к диссертационной работе.

#### **Положения, выносимые на защиту**

- 1 Предложенная на основании анализа международных и отечественных нормативных документов базовая концептуальная модель процедуры испытаний включает в себя все необходимые и достаточные элементы для проведения испытаний ИПО: объект испытаний, требования, методы и нормативные документы, ПМИ, испытатель и результат испытаний.
- 2 Разработанная типовая программа и методика испытаний позволяет значительно сократить время на разработку документов, проведение испытаний, является инструментом повышения качества проводимых в области испытаний ИПО работ. Типовая ПМИ может использоваться как разработчиками ИПО, так и испытателями при проведении испытаний встроенного и авто-

номного измерительного программного обеспечения вне зависимости от выбранного типа процедуры.

- 3 Предложенный метод проверки функции ИПО, реализующей уменьшение систематической погрешности измерительных каналов аппаратно-программных комплексов, основанный на обратном преобразовании и выполнении мультипликативных операций над исходными результатами измерений, позволяет повысить достоверность функциональных проверок измерительного программного обеспечения.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- III Международная научно-техническая конференция "Метрологическое обеспечение измерительных систем", г. Пенза, 2006 г.;
- XXIV Международная научно-практическая конференция по метрологии, г. Санкт-Петербург, 2006 г.;
- XIII и XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные техника и технологии", г. Томск, 2007 и 2010 гг.;
- XI Всероссийская научно-техническая конференция "Метрологическое обеспечение учета энергетических ресурсов", г. Анапа, 2009 г.;
- I Научно-практическая конференция "Информационно-измерительная техника и технологии", посвященная 50-летию кафедры "Информационно-измерительная техника" Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, ТПУ, 2010 г.

По результатам работы автор был признан победителем в следующих конкурсах:

- Конкурс "Индивидуальный грант молодого учёного Томского политехнического университета", 2010 г.
- Всероссийский конкурс "Инженер года" по версии "Инженерное искусство молодых" в номинации "Приборостроение и диагностика", 2011 г.

**Публикации.** Основные результаты исследований отражены в 11 публикациях: четыре статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК, в том числе одна статья в зарубежном издании (импакт-фактор 0,764), включенном в систему цитирования Science Citation Index Expanded (база по естественным наукам); семь статей в сборниках трудов международных и российских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и электронных ресурсов из 154 библиографических ссылок и приложений. Работа содержит 175 страниц основного текста, включая 38 рисунков и 54 таблицы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, определены решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность результатов работы.

**В первой главе** "Анализ требований к измерительному программному обеспечению" выполнен анализ международных и отечественных документов, распространяющихся на программное обеспечение, обсуждаются классификация и назначение уровней проверки и защиты, приведен обзор методов испытаний и требований к ИПО, а также предложена синтезирующая эти требования стратегия испытаний.

Прежде чем определять требования к ИПО, подлежащие проверке, необходимо выявить особенности объекта испытаний (классифицировать ИПО) и назначить уровни проверки и защиты. Многообразие видов ИПО обусловлено многофункциональностью разрабатываемых программ, особенностями реализации алгоритмов, различными областями применения средств измерений и измерительных систем (ИС). Недостатками рассмотренных в работе схем классификации ИПО являются: избыток классификационных признаков, невозможность практического применения классификаций для определения уровней проверки, защиты и установления набора требований к ИПО, а также несогласованность с отечественными нормативными документами.

Рассмотрены требования и методы испытаний ИПО, регламентированные международными и отечественными документами. Удобным для практического применения при испытаниях ИПО международным документом является *руководство WELMEC 7.2*. Однако его недостатками для применения в Российской Федерации являются: рекомендательный характер документа, несогласованность с отечественными нормативными документами в этой области, а также отсутствие оценки влияния ИПО на метрологические характеристики (МХ) средства измерений.

На территории РФ *обязательные требования к ИПО* устанавливаются Федеральным законом РФ "Об обеспечении единства измерений" для средств измерений, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В стандарте ГОСТ Р 8.654-2009 приведены *общие и специальные требования* к программному обеспечению средств измерений, обусловленные необходимостью оценки влияния ПО на метрологические характеристики СИ и защиты обрабатываемой информации, в том числе измерительной, от непреднамеренных и преднамеренных изменений. Все *методы испытаний ИПО* условно делят на три группы: проверка документации, функциональные проверки и анализ исходного кода.

На основании рассмотренных требований и методов испытаний сделан вывод о несогласованности ГОСТ Р 8.654-2009 и методики аттестации (испытаний) МИ 2955-2010 (МИ 3286-2010), которая не содержит методы испытаний на соответствие специальным требованиям.

Анализ нормативных документов, существующих классификаций ИПО, требований и методов испытаний позволил предложить *стратегию испытаний измерительного программного обеспечения*, которая охватывает все необходимые и достаточные элементы испытаний. Каждому этапу стратегии соответствуют необходимые для испытаний средства, документация и участники испытаний: заявитель; испытатель; контролирующие органы. Стратегия включает в себя следующие основные этапы:

- 1) заявитель определяет цель (тип процедуры) испытаний в соответствии с требованиями законодательных и нормативных документов;
- 2) испытатель и заявитель классифицируют ИПО для уточнения характеристик, назначения уровней проверки и защиты, установления требований;
- 3) заявитель подает заявку с уточненными характеристиками ИПО;
- 4) испытатель рассматривает заявку и назначает экспертов для проверок;
- 5) испытатель и заявитель разрабатывают ПМИ, проводят метрологическую экспертизу документации и ИПО, исследуют расчетные алгоритмы, реализованные в ИПО, методы и способы идентификации, защиты и т.д.;
- 6) испытатель после утверждения ПМИ проводит испытания ИПО (при высоком уровне проверки анализирует фрагменты исходного кода);
- 7) испытатель оформляет результаты испытаний ИПО и направляет их для проведения экспертизы в контролирующие организации, назначаемые в соответствии с выбранным типом процедуры;
- 8) контролирующий орган при положительных результатах испытаний выдает соответствующий типу процедуры документ.

Стратегия испытаний *утвержденного* (ранее испытанного) ИПО отличается от приведенной выше заменой этапа разработки ПМИ на проведение метрологической экспертизы с целью анализа внесенных изменений и оценки их влияния на расчетные алгоритмы (метрологические характеристики СИ). Объем проводимых испытаний зависит от причины испытаний и проводится либо в полном объеме либо только в части вносимых изменений.

Предложенные стратегии испытаний положены в основу разработки концептуальной модели процедуры испытаний ИПО.

**Во второй главе** "Разработка типовой программы и методики испытаний измерительного программного обеспечения" приведена базовая концептуальная модель процедуры испытаний, предложенная на основании анализа нормативных документов и отвечающая современным требованиям к ИПО. На основе концептуальной модели систематизированы и описаны основные особенности процедур испытаний.

Предложенная выше стратегия испытаний принимает в расчет три типа процедуры испытаний ИПО: аттестации, сертификации и испытаний ИПО при утверждении типа средств измерений. В результате любого из трёх типов процедур должно быть установлено соответствие ИПО определенным требованиям. Предложена общая схема проведения испытаний, применимая для случаев как *впервые испытываемого* ИПО, так и *ранее испытанного, но подвергнутого изменениям* (рисунок 1).

1. Подача заявки на проведение испытаний	
2. Рассмотрение материалов заявки на соответствие установленным требованиям	
ИПО уже было испытано?	
Нет	Да
3. Разработка и утверждение программы и методики испытаний	6. Согласование (дополнение) существующей программы и методики испытаний
4. Метрологическая экспертиза документации и ИПО	
5. Проведение испытаний согласно утвержденной ПМИ	7. Проверка соответствия ИПО ранее испытанному
8. Оформление и утверждение протокола и акта испытаний	
9. Экспертиза материалов испытаний и выдача Заявителю документа (свидетельства или сертификата)	

Рисунок 1 – Общая схема проведения испытаний ИПО

Этапы 1-2 и 8-9 на рисунке 1 являются одинаковыми для обоих случаев испытаний. Этапы 3-5 содержат проверку соответствия документации ИПО требованиям нормативных документов и проведение испытаний. Этапы 6-7 содержат проверку соответствия заявленного программного обеспечения ранее испытанному.

При проведении практических испытаний разрабатываемого и эксплуатируемого измерительного программного обеспечения, объем которых в масштабе страны может быть достаточно велик, общая схема (рисунок 1) не обеспечивает требуемую детализацию. Поэтому существует необходимость в концептуальной модели процедуры испытаний ИПО, которая содержала бы элементы, позволяющие определять тип процедуры (аттестация, сертификация или испытания ИПО при утверждении типа СИ) и анализировать ее особенности с единых позиций процессного подхода.

Предложенная в работе концептуальная модель (рисунок 2) охватывает необходимый и достаточный набор элементов процесса испытаний ИПО в отличие от действующих нормативных и рекомендательных документов.

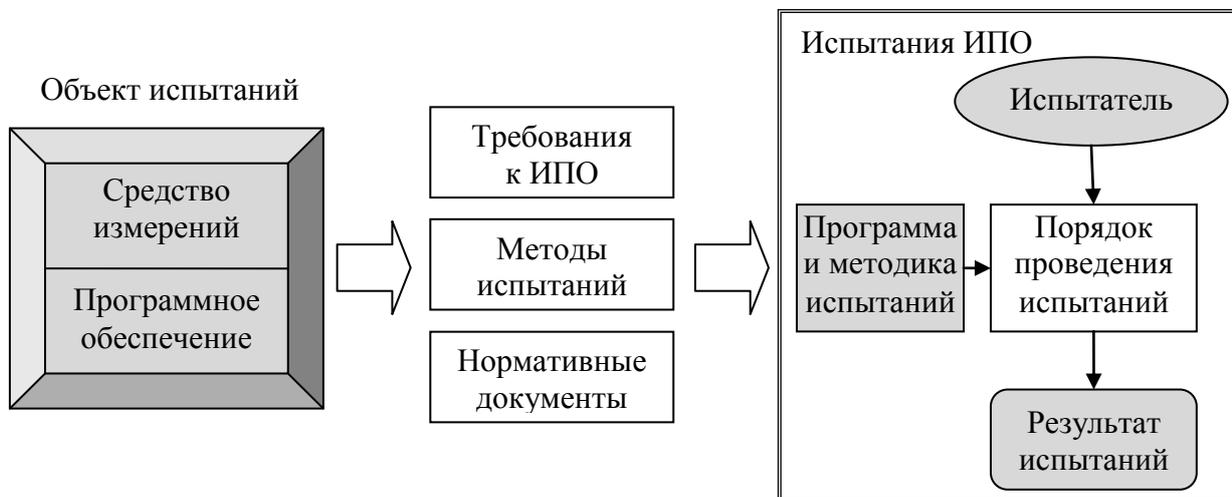


Рисунок 2 – Базовая концептуальная модель процедуры испытаний ИПО

Элементы разработанной модели взаимодействуют друг с другом следующим образом:

- заявитель при составлении заявки выбирает тип процедуры (цель) испытаний в зависимости от конкретного *объекта испытаний*, области его применения, выполняемых функций и т. д.;
- на основании выбранного типа процедуры, описания объекта испытаний, назначенных уровней проверки и защиты, реализованных в ИПО расчетных алгоритмов, методов идентификации и защиты испытатель определяет набор *требований к ИПО, методы испытаний*, перечень *нормативных* и иных документов, на соответствие которым необходимо проверить ИПО, а также *порядок проведения испытаний*;
- руководствуясь выбранными требованиями и методами испытаний, нормативными документами, испытатель самостоятельно или совместно с заявителем разрабатывает и утверждает *программу и методику испытаний*;
- *испытания ИПО* проводит уполномоченная организация – *испытатель* – в соответствии с установленным порядком и типом процедуры испытаний;
- *результатом испытаний* является документ, выдаваемый в соответствии с принятым порядком и соответствующий выбранному типу процедуры.

Выбор той или иной процедуры испытаний определяется требованиями законодательных и нормативных документов, а также желанием разработчика (пользователя) ИПО подтвердить его соответствие установленным требованиям. В работе в соответствии с основными элементами концептуальной модели приведены описания всех трёх типов процедур. Пример такого описания для процедуры испытаний ИПО при утверждении типа комплексов измерительно-вычислительных МикроТЭК-09 (ООО НПП "ТЭК") приведён в таблице 2.

В диссертационной работе в соответствии с базовой концептуальной моделью разработана *типовая программа и методика испытаний ИПО*, которая имеет универсальный характер и может применяться для всех типов процедур. Из анализа существующих стандартизованных программ испытаний ИПО следует необходимость разработки структуры типовой ПМИ, которая должна содержать следующие основные разделы:

- объект и цель испытаний;
- нормативные ссылки;
- термины, определения и сокращения;
- перечень документации, аппаратного и программного обеспечения;
- требования к ИПО;
- порядок проведения испытаний;
- методы испытаний;
- оформление результатов испытаний;
- приложения.

Предложенная структура типовой ПМИ учитывает основные требования и особенности ИПО и соответствует основным элементам концептуальной модели процедуры испытаний: объект испытаний, требования к ИПО и соответствующие им методы испытаний, порядок проведения и результаты испытаний.

Сущность ПМИ определяется установленным набором требований к испытываемому ИПО. В работе общие и специальные требования стандарта ГОСТ Р 8.654-2009 дополнены требованиями к функционированию, которые определяет организация-заявитель на стадии разработки технического задания программного обеспечения или средства измерений, а также требованиями, учитывающими специфические особенности ИПО и СИ (рисунок 3).

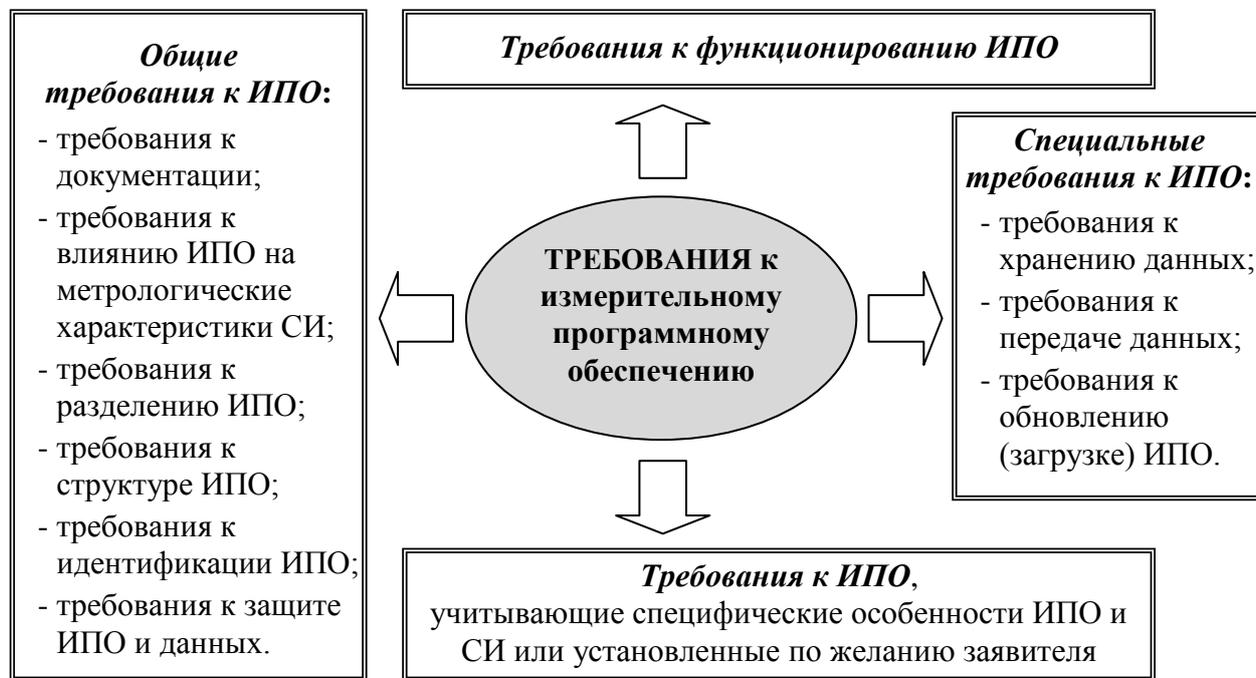


Рисунок 3 – Требования к ИПО

В отличие от существующих методик МИ 2955-2010 и МИ 3286-2010, разработанная типовая программа и методика испытаний ИПО обеспечивает полное соответствие методов испытаний ИПО проверяемым требованиям; впервые включает в себя проверку правильности функционирования ИПО и методы испытаний на соответствие специальным требованиям. Разработанная ПМИ удобна для применения разработчиками ПО, испытателями и контролирующими органами на разных стадиях жизненного цикла ИПО, обеспечивает значительное сокращение времени на разработку документации и проведение испытаний ИПО. Она подходит для любого типа процедур испытаний и может служить инструментом повышения качества разработки и проверки ИПО.

**В третьей главе "Апробация типовой программы и методики испытаний"** приведены результаты испытаний ИПО средств измерений и измерительных систем для всех типов процедур.

Приведены результаты практических испытаний ИПО следующих СИ:

- теплосчетчика ТСШ-1М-02 (теплосчетчика);
- измерительно-вычислительного комплекса МикроТЭК-09 (ИВК);
- систем измерений количества и показателей качества нефти (СИКН);
- автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учёта электрической энергии (АИИС КУЭ);

- автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП).

Согласно стратегии, приведенной в главе 1, после классификации ИПО назначаются уровни его проверки и защиты и устанавливаются наборы проверяемых требований (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация и установление требований к испытанному ИПО

Вид ИПО	Встроенное ИПО		Автономное ИПО		
	СИ с индикацией		ИПО*	ИПО**	модифицируемое
	коммерческое	модифицируемое	целевое	модифицируемое	
Название ИПО	ПО теплосчетчика	ПО ИВК	ПО АИИС КУЭ	ПО АСУ ТП	ПО СИКН
Тип процедуры испытаний ИПО	Сертификация	Испытания ИПО при утверждении типа СИ			Аттестация
Уровни проверки и защиты					
Уровень проверки	средний	средний	средний	средний	
Уровень защиты	А	С	С	С	С
Общие требования, предъявляемые к ИПО					
Документация	+	+	+	+	+
Функционирование ИПО	+	+	+	-	+
Влияние ИПО на МХ средства измерений	+	-*	-*	-	+
Разделение ИПО	-	+	+	-	+
Структура ИПО	-	+	+	+	+
Идентификация ИПО	+	+	+	+	+
Защита ИПО и данных	+	+	+	+	+
Специальные требования, предъявляемые к ИПО					
Хранения данных	+	-	-	-	-
Передача данных	-	-	-	-	+
Обновление (загрузка) ИПО	-	-	-	-	-
Примечание – В таблице приняты следующие обозначения: * – влияние ИПО учтено при определении метрологических характеристик СИ, ** – ИПО не выполняет функцию обработки измерительной информации					

При проведении испытаний проверялось соответствие программного обеспечения приведенным в таблице 1 требованиям. Рассмотрим особенности испытаний встроенного и автономного ИПО на двух примерах: ИВК и СИКН.

Встроенное ИПО ИВК функционирует под управлением операционной системы MS Windows CE, что позволило разработчикам (ООО НПП "ТЭК", г. Томск) выполнить разделение на метрологически значимую и незначимую части ИПО на "высоком" уровне по МИ 2955-2010. ПО ИВК предназначено для измерений, вычислений, индикации, архивирования параметров нефти при коммерческом и оперативном учёте, а также управления режимами работы систем измерений количества нефти. Цель проведения испытаний – идентификация программного обеспечения и оценка его влияния на МХ ИВК. Испытания проводились ГЦИ СИ ФБУ "Томский ЦСМ" на базе ООО НПП "ТЭК".

В таблице 2 приведены основные элементы процесса испытаний ПО ИВК в соответствии с базовой концептуальной моделью (рисунок 2) и классификацией ИПО (таблица 1).

Таблица 2 – Испытания ИПО при утверждении типа ИВК

Объект испытаний	Требования к ИПО:	Испытания ИПО при утверждении типа ИВК	
		Порядок проведения испытаний	Испытатель
программное обеспечение ИВК МикроГЭК-09	– степень соответствия ИПО сопровождающей документации; – правильность функционирования ИПО; – разделение ИПО; – структура ИПО; – идентификационные данные ИПО; – уровень защиты ИПО и данных	1. Подача заявки на проведение испытаний в целях утверждения типа ИВК. 2. Рассмотрение заявки и принятие решения о возможности проведения испытаний ИВК. 3. Разработка, согласование и утверждение программы испытаний в целях утверждения типа ИВК. 4. Проведение испытаний ИПО при испытаниях типа ИВК. 5. Разработка по результатам испытаний проекта описания типа (МИ 3290-2010) и утверждение методики поверки.	ГЦИ СИ ФБУ "Томский ЦСМ"
	<i>Программа и методика испытаний</i>	6. Оформление результатов испытаний в виде протокола испытаний ИПО (Р 50.2.077-2011) и акта испытаний ИВК (МИ 3290-2010).	<i>Результат испытаний</i>
	Программа испытаний в целях утверждения типа, утвержденная ГЦИ СИ ФБУ «Томский ЦСМ» в июне 2011 г.	7. Направление материалов испытаний и документации на ИВК для проведения экспертизы в ФГУП "ВНИИМС".	Протокол и акт испытаний ИВК
	<i>Нормативные документы</i>	8. Проведение экспертизы и оформление Росстандартом свидетельства об утверждении типа ИВК	Свидетельство об утверждении типа, выданное Росстандартом (номер в Госреестре СИ 48147-11)
	ГОСТ Р 8.664, МИ 3290, МИ 3286, Р 50.2.077 и др.		

Особенностью испытаний автономного ИПО СИКН является оценивание его влияния на выполнение метрологически значимой функции "Выполнение поверки преобразователей расхода турбинных по МИ 1974". Оно проводилось в режиме имитации сигналов датчиков давления, температуры, расхода, плотности и трубопоршневой поверочной установки методом сравнительных испытаний с применением опорной программы, разработанной в стандартном пакете Microsoft Excel. Экспериментальная проверка алгоритмов поверки преобразователей расхода (ПР) позволила выявить ошибку в нормативном документе МИ 1974-2004 и его несоответствии стандарту ГОСТ 8.207-76 по обработке результатов прямых измерений с многократными наблюдениями. В рекомендациях МИ 1974-2004 отсутствовало условие для расчета границ погрешности ПР при пренебрежении неисключенной систематической составляющей. В этом случае при функциональной проверке реализованного алгоритма поверки получали погрешность ПР, равную нулю, а не границам случайной составляющей погрешности согласно ГОСТ 8.207-76.

Полученные результаты практической апробации позволили выполнить анализ типичных ошибок (проблем), возникающих при проведении испытаний

измерительного программного обеспечения. Установлено, что основные проблемы и затруднения возникают из-за отсутствия реализации требований к ИПО, и как следствие, невозможности их проверки, недостатка методических материалов по проведению испытаний, а также нежелания разработчиков СИ проводить экспертизу и проверку ИПО на всех стадиях его жизненного цикла в соответствии с требованиями отечественных нормативных документов и международных рекомендаций.

**В четвертой главе** "Проверка функции ИПО по уменьшению систематической погрешности результатов измерений" предложен и апробирован метод экспериментальной проверки функции ИПО по уменьшению систематической погрешности результатов измерений, основанный на обратном преобразовании.

Одной из необходимых функций измерительной системы является автоматическая коррекция результатов измерений с помощью встроенных эталонных мер. Реализуемые на основе этих функций процедуры калибровки и автокалибровки измерительных каналов систем обеспечивают сокращение ресурсов, повышение точности и достоверности результатов измерений. Таким образом, в состав необходимых функциональных проверок при испытаниях ИПО необходимо включать проверку правильности реализации и выполнения алгоритмов повышения точности измерений.

В работе рассмотрен алгоритм уменьшения систематической погрешности, в котором коррекцию результата измерений проводят за два такта с использованием мультипликативных арифметических операций (возведение в квадрат и деление):

1) измеряют величину  $x$ , цифровой код результата измерений  $y_1$  запоминают и подают на вход обратного преобразователя, в качестве которого может быть использован цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);

2) измеряют величину  $y_1$ , цифровой код результата измерений  $y_2$  запоминают и используют для вычисления скорректированного результата измерений  $y_c$  по формуле:

$$y_c = \frac{y_1^2}{y_2}. \quad (1)$$

Для проверки функции ИПО, реализующей указанный алгоритм, предложен метод, использующий вместо ЦАП прецизионную регулируемую многозначную меру, с помощью которой на первом этапе алгоритма формируется аналоговый сигнал, равный измеренному значению  $y_1$ .

В работе рассмотрен канал косвенного измерения активного сопротивления, реализованный на базе двух 4,5-разрядных вольтметров В7-22А, измеряющих напряжение и силу постоянного тока. Уменьшение систематической погрешности результатов измерений канала производится с применением указанного выше алгоритма повышения точности. Экспериментальная проверка фактического уменьшения была проведена с помощью программируемого калибратора тока и напряжения Fluke 5520А. Воспроизведение измеряемых зна-

чений активного сопротивления  $R_n$  осуществлялось с помощью магазина сопротивления P4831 с классом точности  $0,02/2 \cdot 10^{-6}$ .

Пределы относительной погрешности каналов измерений тока и напряжения вольтметра определяются мультипликативной и аддитивной составляющими:

$$\delta_1^v = \frac{0,2 \cdot V_{\text{п}}}{V} = \frac{0,04}{V} \% ; \delta_2^v = 0,15 \% ; \delta_1^i = \frac{0,25 \cdot I_{\text{п}}}{I} = 0,5 \% ; \delta_2^i = 0,25 \% , \text{ где}$$

$V$  и  $I$  – измеряемые значения напряжения и силы постоянного тока,  $V_{\text{п}}$  и  $I_{\text{п}}$  – верхние пределы измерений напряжения и силы постоянного тока вольтметра.

Сравнение точности результатов измерений сопротивления без коррекции и с коррекцией осуществлялось путем вычисления отклонений результатов косвенных однократных измерений сопротивления  $R$  от номинальных значений  $R_n$  в диапазоне от 0,1 до 1,0 Ом. Измерения выполнялись при номинальном значении силы постоянного тока  $I_n = 100$  мА. Результаты измерений напряжения, силы постоянного тока и вычислений сопротивления сведены в таблицу 3 и представлены на рисунке 4.

Таблица 3 – Экспериментальные данные

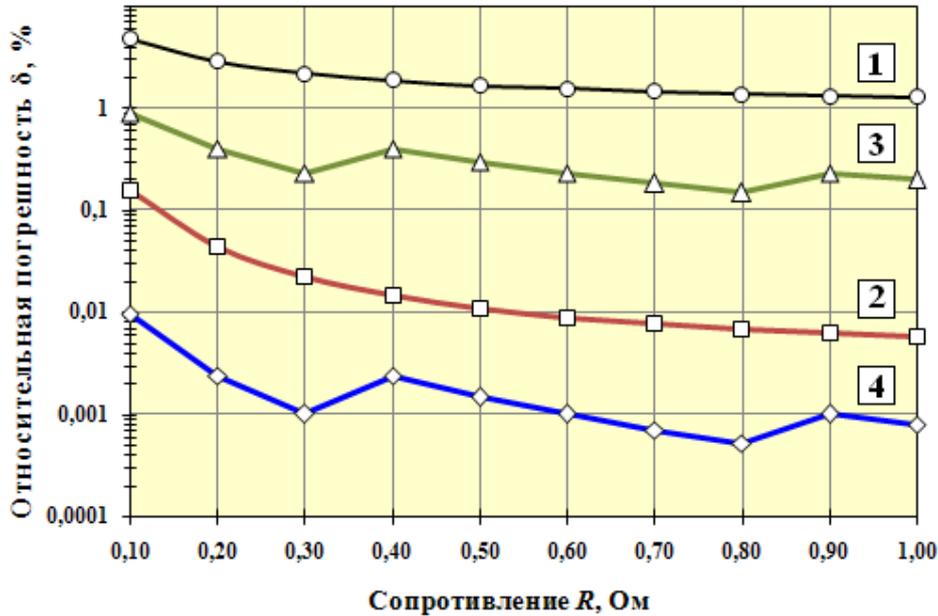
$R_n$ , Ом	Без поправки		$V_1$ , В	$V_2$ , В	$V_c$ , В	$R_3$ , Ом	$R_{3c}$ , Ом	$\delta$ , %	$\delta_c$ , %	$\delta_3$ , %	$\delta_{3c}$ , %
	$V_1$ , В	$V_2$ , В									
0,1	0,0159	0,0160	0,0101	0,0102	0,010001	0,100899	0,100010	4,8635	0,1570	0,8991	0,0097
0,2	0,0259	0,0260	0,0201	0,0202	0,020000	0,200799	0,200005	2,8784	0,0449	0,3996	0,0024
0,3	0,0359	0,0360	0,0301	0,0302	0,030000	0,300699	0,300003	2,2167	0,0229	0,2331	0,0010
0,4	0,0460	0,0462	0,0402	0,0404	0,040001	0,401598	0,400010	1,8859	0,0149	0,3996	0,0024
0,5	0,0560	0,0562	0,0502	0,0504	0,050001	0,501499	0,500007	1,6873	0,0112	0,2997	0,0015
0,6	0,0660	0,0662	0,0602	0,0604	0,060001	0,601399	0,600006	1,5550	0,0091	0,2331	0,0010
0,7	0,0760	0,0762	0,0702	0,0704	0,070001	0,701299	0,700005	1,4605	0,0078	0,1855	0,0007
0,8	0,0860	0,0862	0,0802	0,0804	0,080000	0,801199	0,800004	1,3896	0,0069	0,1499	0,0005
0,9	0,0961	0,0964	0,0903	0,0906	0,090001	0,902098	0,900009	1,3344	0,0063	0,2331	0,0010
1,0	0,1061	0,1064	0,1003	0,1006	0,100001	1,001998	1,000008	1,2903	0,0059	0,1998	0,0008

Для всех  $R_n$  в таблице 3 получены следующие результаты измерений силы постоянного тока:  $I_1 = 100,1$  мА,  $I_2 = 100,2$  мА и  $I_c = 100,0001$  мА. При воспроизведении на магазине сопротивления P4831 значения сопротивления  $R_n$ , равного нулю, показание вольтметра составило 0,0058 В, вследствие влияния переходных сопротивлений контактов и соединительных проводов. Поэтому, значения напряжений  $V_1$  и  $V_2$  были получены из неисправленных данных (см. второй и третий слева столбцы таблицы 3) вычитанием поправки 0,0058 В.

В таблице 3 значениям  $R_3 = \frac{V_1}{I_1}$  соответствуют полученные экспериментально результаты измерений сопротивления без коррекции, значениям

$$R_{3c} = \frac{V_1^2 I_2}{V_2 I_1^2} - \text{результаты измерений сопротивления с коррекцией.}$$

Из таблицы 3 видно, что несмотря на ограниченную разрешающую способность вольтметра, метод уменьшения погрешности работает и обеспечивает повышение точности измерений сопротивления не менее, чем на два порядка.



Пределы погрешности измерений: (1) – без коррекции и (2) – с коррекцией;  
экспериментальная погрешность: (3) без коррекции и (4) – с коррекцией

Рисунок 4 – Зависимость теоретической погрешности измерений сопротивления

График 1 на рисунке 4 показывает изменение пределов относительной погрешности измерений сопротивления без коррекции и построен по формуле:

$$\delta = \frac{\delta^v + \delta^i}{1 + \delta^i} = \frac{\delta_1^v + \delta_2^v + \delta_1^i + \delta_2^i}{1 + \delta_1^i + \delta_2^i} = \frac{0,04}{V} + 0,9 = \frac{0,04 + 0,9 \cdot V}{1,0075} = \frac{0,04 + 0,9 \cdot V}{1,0075 \cdot V}. \quad (2)$$

График 2 на рисунке 4, показывает изменение относительной погрешности измерений сопротивления с коррекцией и построен по формуле:

$$\delta_c = \frac{\frac{\delta_1^v \delta^v}{(1 + \delta^v)^2 - \delta_1^v \delta^v} + \frac{\delta_1^i \delta^i}{(1 + \delta^i)^2 - \delta_1^i \delta^i}}{1 + \frac{\delta_1^i \delta^i}{(1 + \delta^i)^2 - \delta_1^i \delta^i}}. \quad (3)$$

Зависимости погрешностей экспериментальных результатов измерений сопротивления без коррекции и с коррекцией показаны на рисунке 4 (кривые 3 и 4). Эти графики построены по формулам:

$$\delta_3 = \frac{|R_H - R_3|}{R_H} \cdot 100\%, \quad \delta_{3c} = \frac{|R_H - R_{3c}|}{R_H} \cdot 100\%. \quad (4)$$

В ходе экспериментальных исследований установлено, что значение напряжения  $V_2$  может изменяться только в узком диапазоне (таблица 4):

$$V_1 - V_H = V_2 - V_1. \quad (5)$$

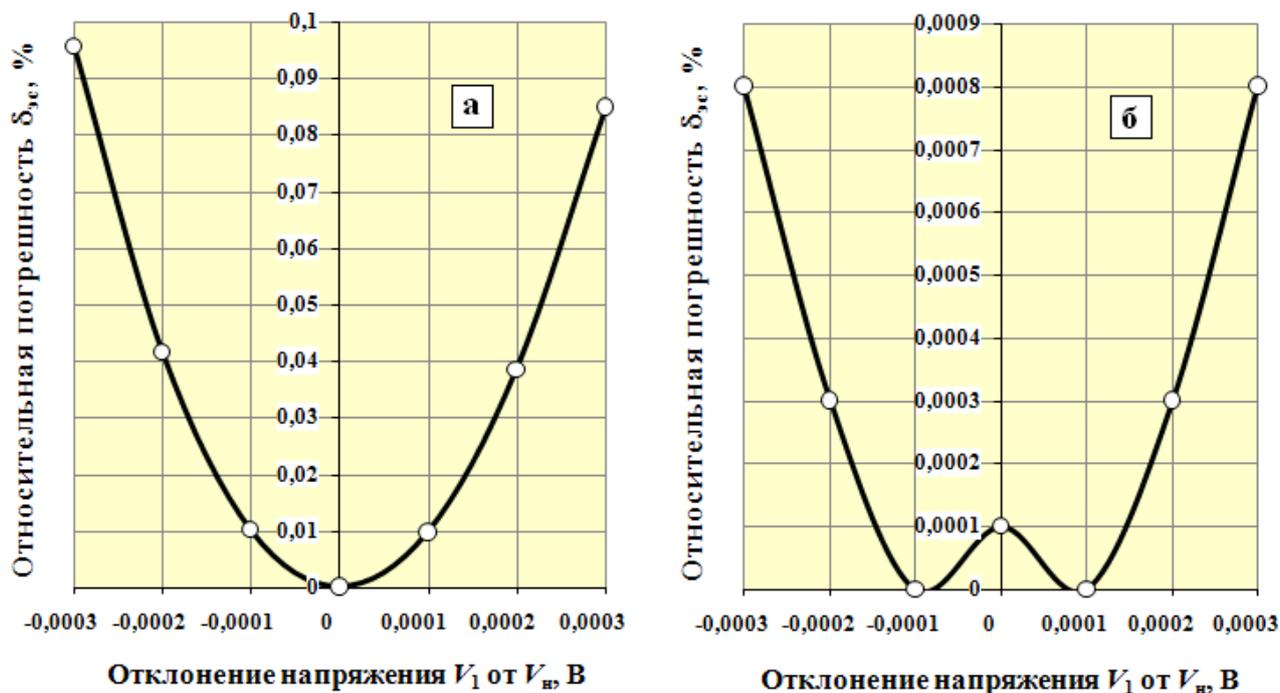
Из этого факта следует значительное влияние случайной погрешности на работоспособность метода уменьшения систематической погрешности. В слу-

чае доминирования систематической составляющей над случайной (что имеет место в рассматриваемом эксперименте) метод обеспечивает значительное уменьшение значения систематической погрешности.

Таблица 4

Разность напряжений ( $V_1 - V_H$ ), В	$R_H = 0,1 \text{ Ом}$ ( $V_H = 0,01 \text{ В}$ )			$R_H = 1 \text{ Ом}$ ( $V_H = 0,1 \text{ В}$ )		
	$V_1$ , В	$V_2$ , В	$\delta_{эс}$ , %	$V_1$ , В	$V_2$ , В	$\delta_{эс}$ , %
-0,0002	0,0098	0,0096	0,04157	0,0998	0,0996	0,0003
-0,0001	0,0099	0,0098	0,0101	0,0999	0,0998	0
0	0,0100	0,0100	0,0001	0,1000	0,1000	0,0001
0,0001	0,0101	0,0102	0,0097	0,1001	0,1002	0
0,0002	0,0102	0,0104	0,03836	0,1002	0,1004	0,0003
0,0003	0,0103	0,0106	0,08481	0,1003	0,1006	0,0008

Данные таблицы 4 и рисунка 5 показывают зависимость экспериментальной скорректированной погрешности измерений  $\delta_{эс}$  от отклонения ( $V_1 - V_H$ ) в начале диапазона ( $R_H = 0,1 \text{ Ом}$  и  $V_H = 0,01 \text{ В}$ , рисунок 5, а) и в конце диапазона ( $R_H = 1,0 \text{ Ом}$  и  $V_H = 0,1 \text{ В}$ , рисунок 5, б). На графиках видно, что максимальная коррекция достигается, когда значение отклонения напряжения  $V_1$  от номинального  $V_H$  изменяется от 0 до 0,0001 В.



(а) – случай  $R_H = 0,1 \text{ Ом}$  и  $V_H = 0,01 \text{ В}$ ; (б) – случай  $R_H = 1 \text{ Ом}$  и  $V_H = 0,1 \text{ В}$

Рисунок 5 – Зависимость погрешности  $\delta_{эс}$  от разности напряжений ( $V_1 - V_H$ )

**В приложениях** диссертации приведены акты внедрения результатов диссертационной работы в ФБУ "Томский ЦСМ", ООО НПП "ТЭК", ООО "Конто-Сервис" и свидетельства (сертификат), выданные по результатам испытаний автономного и встроенного программного обеспечения средств измерений и измерительных систем.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- 1 На основании анализа нормативных документов предложена базовая концептуальная модель процедуры испытаний, отвечающая современным требованиям к измерительному программному обеспечению.
- 2 Разработана типовая программа и методика испытаний измерительного программного обеспечения, включающая основные элементы концептуальной модели процедуры испытаний и позволяющая значительно сократить время разработки программы и методики испытаний ИПО конкретных СИ.
- 3 Предложен и экспериментально исследован метод проверки функции ИПО, реализующей уменьшение систематической погрешности измерительных каналов аппаратно-программных комплексов, основанный на обратном преобразовании и выполнении мультипликативных операций над исходными результатами измерений.
- 4 Разработанная типовая программа и методика испытаний принята к применению в ФБУ "Томский ЦСМ" в виде внутреннего документа – инструкции И 04-10-2010 "Типовая программа и методика испытаний программного обеспечения средств измерений".
- 5 Результаты диссертационной работы были использованы с 2009 г. при проведении испытаний автономного и встроенного измерительного программного обеспечения более 30 средств измерений и измерительных систем, в том числе систем измерений количества и показателей качества нефти и комплексов измерительно-вычислительных МикроТЭК-09 (ООО НПП "ТЭК"); теплосчетчиков ТСШ-1М-02 (ООО "Конто-Сервис"); систем автоматизированных информационно-измерительных коммерческого учета электрической энергии; измерительных систем в составе АСУ ТП и др.
- 6 Материалы испытаний ИПО прошли экспертизу в компетентных организациях Росстандарта и подтверждены следующими документами: свидетельством об аттестации № АПО-007-11 и свидетельством об утверждении типа ИВК, внесённого в Государственный реестр СИ под номером 48147-11.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1 **Злыгостева Г.В., Чухланцева М.М.** Современные подходы к аттестации программного обеспечения средств измерений // *Измерительная техника*. – 2007. – № 5. – С. 65–68.
- 2 **Злыгостева Г.В., Муравьев С.В.** Обобщенная модель процедуры испытаний измерительного программного обеспечения // *Известия Томского политехнического университета*. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 62–67.
- 3 **Чухланцева М.М., Злыгостева Г.В., Артюхина Л.В.** Аттестация программного обеспечения систем учета нефти // *Законодательная и прикладная метрология*. – 2009. – № 4. – С. 22-24.

4 **Muravyov S.V., Zlygosteva G.V., Borikov V.N.** Multiplicative method for reduction of bias in indirect digital measurement result // *Metrology and Measurement Systems*. – 2011. – Vol. 18. – No. 3. – P. 481–490.

5 **Злыгостева Г.В., Чухланцева М.М.** Аттестация программного обеспечения средств измерений // Сборник трудов XXIV Международной научно-практической конференции по метрологии. – Санкт-Петербург, 21–22 ноября 2006. – СПб: Борей-Арт, 2006. – С. 40–45.

6 **Злыгостева Г.В.** Оценка качества программного обеспечения средств измерений // *Современные техника и технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Томск, ТПУ, 26–30 марта 2007. – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – Т. 2. – С. 339–340.

7 **Злыгостева Г.В., Чухланцева М.М.** Современные подходы к аттестации программного обеспечения средств измерений // *Метрологическое обеспечение измерительных систем: сборник трудов III Международной научно-технической конференции*. – Пенза, 2–6 октября 2006. – Пенза: ФГУ "Пензенский ЦСМ", 2006. – С. 31–36.

8 **Злыгостева Г.В.** Требования к программному обеспечению средств измерений и измерительных систем // *Журнал интеллектуальных технологий Itech*. – 2009. – № 14. – С. 50–55.

9 **Чухланцева М.М., Артюхина Л.В., Злыгостева Г.В., Бедарева Е.В.** Испытания программного обеспечения средств учета энергоресурсов // *Метрологическое обеспечение учёта энергетических ресурсов: сборник трудов XI Всероссийской научно-технической конференции*. – Анапа, 1–5 июня 2009. – Анапа, 2009. – С. 67–70.

10 **Злыгостева Г.В.** Оценивание неопределенности измерений аппаратно-программных модулей фирмы National Instruments // *Современные техника и технологии: сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. – Томск, ТПУ, 12–16 апреля 2010. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – Т. 1. – С. 202–203.

11 **Злыгостева Г.В.** Опыт проведения испытаний аппаратно-программных средств систем учета энергоресурсов // *Информационно-измерительная техника и технологии: сборник материалов I Научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры "Информационно-измерительная техника" Национального исследовательского Томского политехнического университета*. – Томск, ТПУ, 25–26 февраля 2010. – Томск: Изд. ТПУ, 2010. – С. 83–85.