

На правах рукописи

**ПАНЬКОВ АНДРЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ**

Специальность 05.11.15 - Метрология и метрологическое обеспечение

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

г. Москва  
2016 г.

Работа выполнена в Федеральном Государственном унитарном предприятии  
«Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы»  
Российской Федерации.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Кудеяров Юрий Алексеевич,**  
Главный научный сотрудник ФГУП «ВНИИМС»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Данилов Александр Александрович,**  
Заместитель директора Пензенского ЦСМ

доктор технических наук  
**Левин Александр Давидович,**  
ведущий научный сотрудник ФГУП «ВНИИОФИ»

Ведущая организация: Московский государственный технический  
университет им. Н.Э. Баумана

Защита диссертационной работы состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.  
в \_\_\_ : \_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП  
«ВНИИМС» по адресу: 119361, Москва, ул. Озерная, д.46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Лысенко В.Г.

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность работы

Подавляющее большинство современных средств измерений представляют собой автоматизированные приборы, которые включают в себя или сопровождаются программным обеспечением. Хорошо известно, что использование ПО в СИ приводит к появлению рисков, связанных как с внутренними свойствами самого ПО, так и с возможностью внешнего воздействия на него. Это приводит к тому, что всё чаще ставятся вопросы о доверии к результатам измерений, полученным с применением такого СИ, о степени влияния программного обеспечения на метрологические характеристики СИ и об уровне его защищённости от внешних воздействий, могущих привести к искажению измерительной информации. Отсюда следует, что одной из основных задач работников метрологических служб в современных условиях является задача оценки и минимизации рисков, связанных с использованием ПО в СИ.

Актуальность данной проблемы на законодательном метрологическом уровне была в свое время обозначена таким авторитетным деятелем в области законодательной метрологии, как директор МОЗМ J.F. Magana, который в бюллетене МОЗМ v. XLIX, N 2, 2008 отметил, что современные СИ в ряде случаев оснащены таким ПО, которое может радикально расширять и видоизменять функциональные возможности СИ. При этом органы, ответственные за утверждение типа СИ, в ряде случаев по тем или иным причинам не способны дать корректные и исчерпывающие ответы на вопросы, связанные с защищенностью ПО и измеренных данных, а также гарантировать в сложившейся ситуации их достоверность. Эти проблемы являются решающими для законодательной метрологии, чьей задачей является обеспечение доверия к результатам измерений, полученными средствами измерений, функционирующими без систематического и постоянного надзора со стороны компетентных метрологических органов. Если технологии защиты информации не будут использоваться в этих средствах измерений, доверие не может быть обеспечено, и все другие метрологические и технические решения, поставляемые законодательной метрологией, будут иметь очень ограниченный интерес.

В отечественных нормативных документах федерального уровня указание о необходимости проведения оценки влияния ПО на метрологические характеристики СИ и уровня его защищенности закреплено в п. 1 и 2 ст. 9 Федерального закона РФ «Об обеспечении единства измерений» и в приказах Минпромторга России от 30 ноября 2009 г. №1081 и Минэкономразвития России от 30 мая 2014 г. № 326. Указанные нормативные документы устанавливают необходимость проведения оценки ПО СИ, но не поясняют механизм и методику ее осуществления.

Из сказанного следует, что вопросы, связанные с разработкой, исследованием и совершенствованием методов оценки и испытаний ПО СИ являются актуальными, и их рассмотрение вызвано насущными и реальными проблемами, стоящими перед разработчиками, пользователями и испытателями автоматизированных средства измерений.

Таким образом, возникает важная научно-техническая задача научного обоснования, разработки, исследования и совершенствования методов испытаний и оценки характеристик и свойств ПО СИ. Решению этих задач посвящена предлагаемая диссертационная работа.

### **Цель диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является исследование и разработка методов испытаний ПО СИ, в том числе опорного ПО, и выработка критериев оценки характеристик и свойств ПО СИ.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие научные и практические задачи:

1. Провести анализ и исследование существующих требований к программному обеспечению СИ, контролируемому законодательной метрологией, с целью обоснования выбора оптимального набора требований.
2. Провести анализ и исследование существующих методов проверки и критериев оценки качества (характеристик и свойств) ПО СИ с целью их дальнейшего совершенствования.
3. Разработать типовую методику проведения испытаний ПО СИ.
4. Разработать опорное программное обеспечение для испытаний ПО СИ цифровых подстанций в соответствии с протоколом IEC 61850-9-2.
5. Исследовать метод испытания программного обеспечения, основанный на перекрестной проверке (кросс-валидации), и сформулировать количественный критерий оценки качества (характеристик и свойств) ПО.
6. Исследовать возможность применения критериев адекватности аппроксимирующих функций (коэффициентов детерминации, информационных критериев и критерия Колмогорова) в методе калибровочных кривых.

### **Объект исследования**

Программное обеспечение средств измерений.

### **Методы и средства исследования**

В работе применялись эмпирические и теоретические методы исследования (методы анализа и синтеза, сравнения и моделирования). Теоретические исследования осуществлялись методами программного и математического моделирования с использованием аппарата математической статистики, численных методов математического анализа, которые послужили основой для разработки и реализации программных алгоритмов в средах C Builder, Mathcad, Dreamweaver. Эмпирические исследования проводились в ФГУП «ВНИИМС» и базировались на сравнении полученных теоретических выводов с экспериментальными результатами исследований, проводимых на

реальных массивах данных измерений, полученных от компаний ООО «Теквел», ООО «Систел» и ООО «Компания ДЭП» и ООО «ЭнергопромАвтоматизация».

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. По результатам проведенного анализа и исследований обоснован оптимальный набор требований к ПО СИ и определен порядок проведения испытаний ПО при испытаниях автоматизированных СИ с целью утверждения типа, реализованный в рекомендациях Росстандарта по метрологии Р 50.2.077 – 2014.
2. На основе предложенного набора требований разработан ряд опорных программных продуктов для испытаний ПО СИ, в том числе ПО цифровых подстанций в соответствии с протоколом IEC 61850-9-2.
3. На основе проведенного анализа и полученных результатов исследований разработаны два национальных стандарта, содержащие требования к ПО СИ и усовершенствованный вариант типовой методики испытаний такого ПО.
4. Экспериментально подтверждена возможность использования метода перекрестной проверки (кросс-валидации) при оценке и подборе модельно зависимых параметров качества передаваемой электроэнергии.
5. Наряду с известными информационными критериями показана возможность применения критерия Колмогорова для отбраковки неадекватных модельных функций в методе калибровочных кривых.

**Основные положения, выносимые на защиту**

1. Разработанная методика проверки уровня защищенности и идентификационных признаков ПО позволяет проводить его испытания при испытаниях СИ для целей утверждения типа.
2. Разработанные национальные стандарты и опорные ПП позволяют проводить испытания ПО СИ, в том числе ПО цифровых подстанций в соответствии с протоколом IEC 61850-9-2.
3. Подход, основанный на использовании метода кросс-валидации и количественного критерия оценки качества ПО применим для оценки значений модельно-зависимых параметров.
4. Критерий Колмогорова может быть эффективно использован в методе калибровочных кривых для отбраковки неадекватных модельных функций.

**Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы заключается в том, что полученные результаты позволяют принципиально усовершенствовать процедуру испытаний в целях утверждения типа средств измерений за счет введения дополнительных методов проверки ПО СИ, что, в свою очередь, позволяет:

- повысить доверие к результатам измерений, полученным с применением такого СИ,
- убедиться в отсутствии несанкционированного доступа к метрологически значимой части ПО СИ и данным;

- установить уровень защищенности ПО СИ;
- провести оценку влияния ПО СИ на МХ СИ;
- ускорить и удешевить процедуру проверки ПО СИ цифровых подстанций.

### **Достоверность и обоснованность**

Достоверность и обоснованность защищаемых научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректностью применения логического и математического аппарата; достаточным объемом и результатами испытаний ПО СИ, выполненных в аккредитованных лабораториях организациями, проводящими испытания в целях утверждения типа средств измерений; достаточным объемом и результатами испытаний ПО, выполненных в СДС ПО СИ ФГУП «ВНИИМС», СДС ПО СИ и АПК АНО «МИЦ»; использованием для тестирования и отладки опорного ПО эталонных пар данных.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Результаты исследований были использованы при разработке рекомендаций по метрологии, методик института, национальных стандартов и большого количества работ, проводимых в рамках системы добровольной сертификации ПО СИ. В их числе:

1. Национальный стандарт ГОСТ Р 8.654-2015 «ГСИ. Программное обеспечение средств измерений. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения»;
2. Национальный стандарт ГОСТ Р 8.883-2015 «ГСИ. Программное обеспечение средств измерений. Алгоритмы обработки, хранения, защиты и передачи измерительной информации. Методы испытаний»;
3. Рекомендации Росстандарта по метрологии Р 50.2.077-2014 ГСИ. Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения;
4. Методика института МИ 3455-2015 «Требования к программному обеспечению для тестирования средств измерений, осуществляющих генерацию и/или передачу выборок результатов измерений мгновенных значений тока и напряжения в соответствии с стандартом МЭК 61850-9-2LE»;
5. Методика института МИ 3464-2015 «Требования к структуре Ethernet кадра SV сообщений в соответствии с серией стандартов МЭК 61850»;
6. Опорное ПО, используемое при сертификационных испытаниях ПО СИ цифровых подстанций в рамках СДС ПО СИ ФГУП «ВНИИМС» (работы велись с компаниями ООО «Теквел», ООО «Систел» и ООО «Компания ДЭП»);

7. Методы испытаний ПО СИ и критерии оценки качества (характеристик и свойств) ПО при сертификационных испытаниях ПО в рамках СДС ПО СИ ФГУП «ВНИИМС»;
8. Стандарт организации по испытаниям ПО СИ, проводимых в институте, являющийся составной частью системы менеджмента качества ФГУП «ВНИИМС».

### **Апробация работы**

Основные результаты работы доложены и обсуждены на региональных, всероссийских и международных конференциях и семинарах:

- Международный научно-технический семинар «Математическая, статистическая и компьютерная поддержка качества измерений», г. Санкт-Петербург, 2006г.;
- IV Научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение измерительных систем», г. Пенза, 2007г.;
- Отраслевая научно-практическая конференция «Теплоснабжение и когенерация 2014», г. Москва, 2014г.;
- XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Метрологическое обеспечение энергетических ресурсов», г. Анапа, 2014г.;
- 1-я Всероссийская научно-практическая конференция «Современное состояние законодательства в области метрологии, экологической и промышленной и пожарной безопасности», г. Южно-Сахалинск, 2014г.;
- Однодневный семинар, посвященный новой версии Рекомендаций к методикам «Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения», Москва, 2014г.;
- IX Всероссийская научно-практическая конференция «ВЕСЫ-2014», г. Туапсе, 2014г.;
- Региональная конференции ассоциации «Автометхим», г. Нижнекамск, 2014г.;
- Региональная научно-практическая конференция «Автоматизация и метрологическое обеспечение технологических процессов», г. Томск, 2015г.;
- Всероссийская конференция главных метрологов предприятий химического и нефтехимического комплекса, г. Воскресенск, 2015г.;
- XIII Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений», МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра «Метрология и взаимозаменяемость», г. Москва, 2015г.;

- Научная конференция молодых специалистов метрологических институтов, посвященная 90-летию Росстандарта, г. Москва, 2015г.;
- Однодневный технический семинар «Автоматизация. Метрология. Безопасность», г. Находка, 2015г.;
- Семинар КОOMET в рамках РТВ - СОOMET проекта «Поддержка регионального сотрудничества между странами-членами региональной метрологической организации КОOMET», г. Минск, 2015г.;
- 9-я научно-практическая конференция «Метрологическое обеспечение измерительных систем», г. Пенза, 2015г..

### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 16 научных работах, из которых 5 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами к каждой из них, выводов, заключения и библиографии из 113 наименований. Общий объем диссертации изложен на 170 страницах машинописного текста, содержит 14 рисунков, 12 таблиц и 2 приложения.

## **2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** показана важность и актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, аргументирована научная новизна исследования и практическая значимость результатов работы, представлены выносимые на защиту научные положения и сведения об апробации работы.

**В первой главе** осуществлено выделение программного обеспечения средств измерений как объекта исследования и рассмотрено его правовое регулирование в существующей системе нормативно-правовых актов РФ. Был проведен анализ состояния вопроса в области регламентации требований к ПО СИ на основе обширного списка отечественных и международных документов (Рисунок 1).

Проведенный анализ показал, что:

1. Проблема установления и регламентации требований к ПО СИ нашла свое отражение в большом количестве отечественных и международных документах.
2. Упоминание о необходимости проверки ПО СИ в Директиве Евросоюза по средствам измерений в 2004 г. послужило основой для развития этого направления во всем мире, в результате чего были разработаны основные рекомендательные документы ряда метрологических организаций, таких как МОЗМ, КОOMET, WELMЕС.



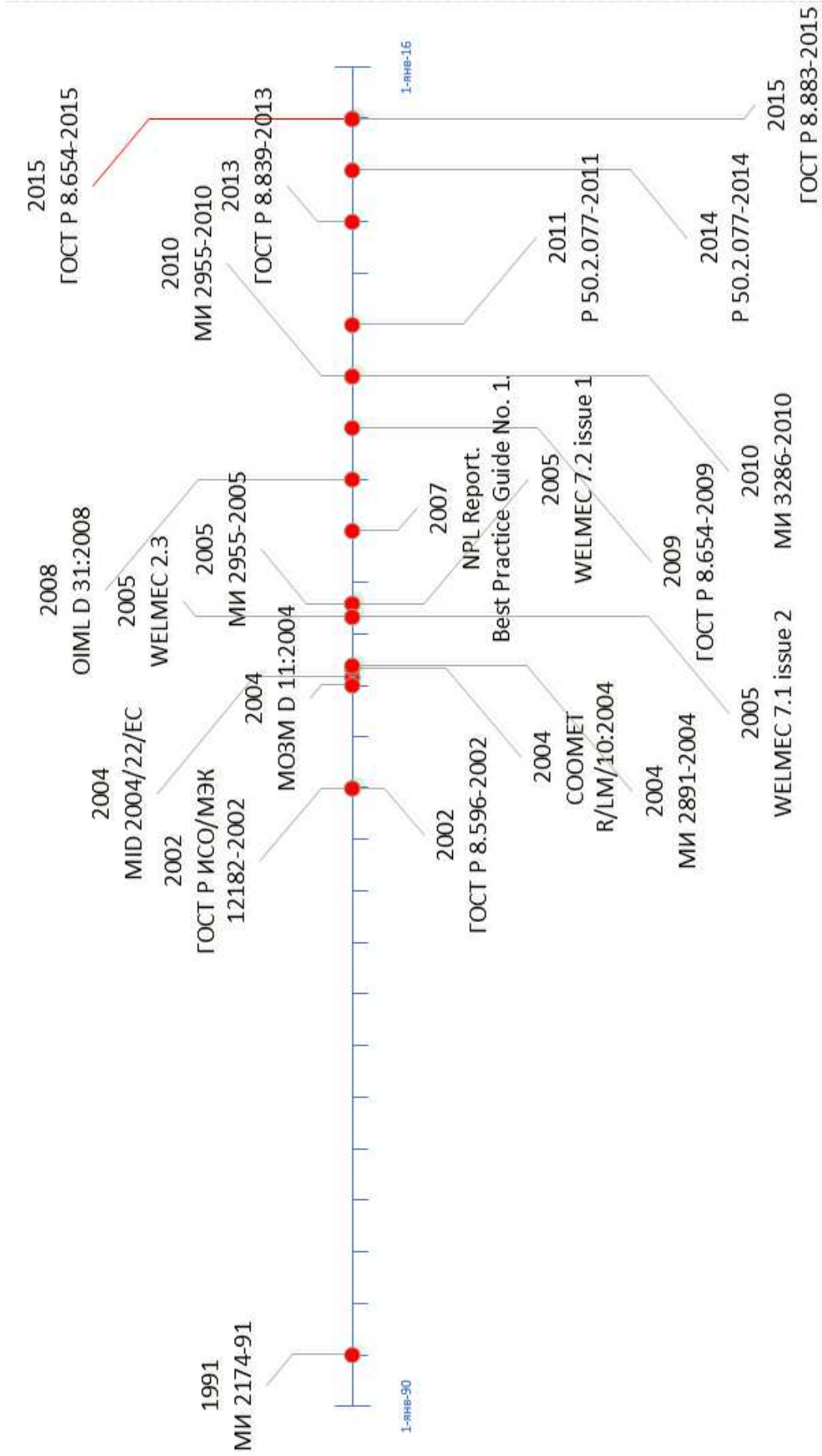


Рис. 1

Временная шкала появления основных документов в области программного обеспечения средств измерений

3. Отечественные метрологические институты и центры ведут активные работы в рассматриваемой области, используя за основу, как вышеуказанные международные нормативные документы, так и собственные разработки.
4. Обзор отечественных нормативных документов и публикаций, а также анализ зарубежного опыта в рассматриваемой области показали, что существующая отечественная нормативная база в отношении требований к ПО СИ находится на высоком уровне и оптимально гармонизирована с требованиями к ПО СИ, предъявляемых в ведущих странах мира. При этом, отечественные нормативные документы учитывают Российскую специфику применения требований к ПО СИ: отсутствие классов риска, расширенные требования к идентификационным признакам ПО, упрощенную, в оговоренных случаях, процедуру проверки защиты ПО СИ, декларирование ряда характеристик ПО (Рисунок 3).
5. Среди многообразия рассмотренных документов основополагающими для установления требований к ПО СИ и в последствии его испытаний являются документы:
  - ГОСТ Р 8.654 Требования к программному обеспечению средств измерений.
  - ГОСТ Р 8.839-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Общие требования к измерительным приборам с программным управлением.
  - Р 50.2.077-2014 ГСИ. Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения.
  - МИ 2174-91. Рекомендация. ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения.

Результатом исследовательской работы стала актуализация стандарта ГОСТ Р 8.654, который с 1 марта 2016 г. вступил в силу в новой редакции.

**Вторая глава** работы посвящена исследованию существующих и разработке новых методов и методик тестирования ПО СИ, а также выработке критериев оценки качества ПО СИ.

Существующие на сегодня методы тестирования ПО не позволяют однозначно и полностью выявить все дефекты анализируемой программы, поэтому все существующие методы тестирования действуют в рамках процесса проверки исследуемого или разрабатываемого программного обеспечения. Такой процесс может доказать, что дефекты отсутствуют с точки зрения используемого метода, а его реализация не сводится к следованию строгим и чётким процедурам или созданию таковых.

В первом разделе второй главы был проведён анализ существующих методик, применяемых при испытаниях программное обеспечение средств измерений в

результате чего удалось выявить ряд особенностей, их характеризующих: методики проверки должны учитывать особенности, характерные для ПО СИ, а процесс проверки представляться следующими основными этапами:

- разработка тестов;
- проведение тестирования;
- обработка результатов тестирования.

При этом, методика проверки ПО должны учитываться требования, предъявляемые к ПО СИ:

- ПО должно иметь структуру с выделением метрологически значимой части;
- данное ПО реализует алгоритмы, сбора, передачи и обработки данных, т.е. к таким алгоритмам применяются требования к точности;
- ПО должно иметь набор идентификационных признаков;
- ПО и данные измерений должны иметь средства защиты от несанкционированных и случайных изменений.

Исследование существующих методик испытаний ПО СИ показали, что наиболее предпочтительным является подход, изложенный в рекомендациях ФГУП «ВНИИМС» МИ2955-2010 «ГСИ. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений», т.к. он учитывает специфику метрологического ПО, носит универсальный характер и не зависит от типа СИ, а также основывается на международном опыте тестирования ПО СИ. Структура документа показана на Рисунке 2.

Результатом исследовательской работы стала переработка и актуализация в данного документа, который с 1 марта 2016 г. вступил в силу в статусе государственного стандарта ГОСТ Р 8.883-2015 «ГСИ. Программное обеспечение средств измерений. Алгоритмы обработки, хранения, защиты и передачи измерительной информации. Методы испытаний».

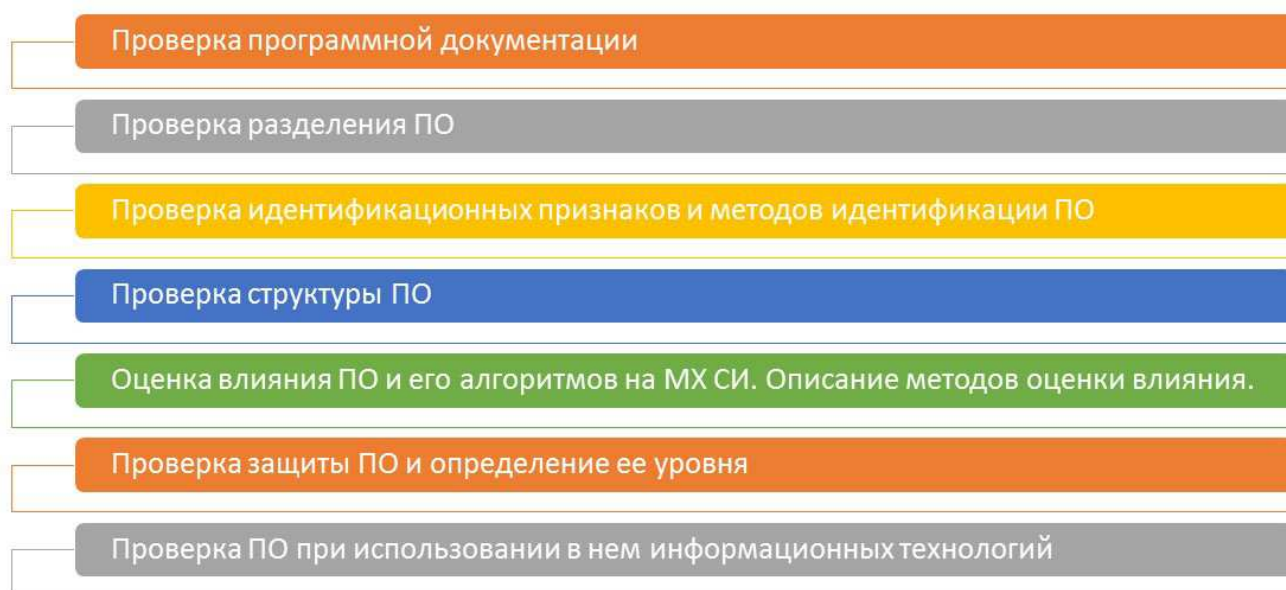


Рис. 2

Структура типовой методики испытаний ПО СИ. В соответствии с ГОСТ Р 8.883-2015 «ГСИ. Программное обеспечение средств измерений. Алгоритмы обработки, хранения, защиты и передачи измерительной информации. Методы испытаний»

Методам тестирования ПО СИ посвящена вторая часть второй главы работы.

Проведен обзор существующих методов тестирования ПО СИ, основанных на методах «черного ящика» и «белого ящика». При тестировании программы методом «черного ящика», она подвергается известному набору воздействий, и по его реакции на эти воздействия делаются заключения о некоторых его свойствах. Метод «белого ящика», подразумевает проверку исходного кода ПО и детальное исследование функций.

Были рассмотрены такие методы тестирования ПО СИ, как:

- метод испытаний, основанный на использовании опорного программного обеспечения;
- метод испытаний ПО СИ с использованием моделей исходных данных, либо с применением метода генерации «эталонных» данных;
- метод сличения программного обеспечения одинакового уровня вычислительной точности;
- метод испытаний, основанный на анализе исходного кода.

Для широкого круга метрологических задач по оценке адекватности калибровочных кривых были рассмотрены методы, основанные на вычислении коэффициента детерминации, скорректированного коэффициента детерминации, информационных критериев Акаике, выборочного критерия Акаике и информационного критерия Байеса. Наряду с информационными критериями была предложена возможность применения критерия Колмогорова.

При использовании критерия Колмогорова рассматриваются три функции:

- функция  $y = y(x)$ , неизвестна и описывает объективно существующую зависимость выходного сигнала от входного;
- эмпирическая функция  $y_n = y(x_n)$ , является эмпирическим представлением функции  $y = y(x)$ ;
- теоретическая функция  $\mathcal{Y}(x | \theta)$ , предлагается для описания функции  $y = y(x)$ .

Статистика Колмогорова  $D$  (максимальное расстояние между функциями) для эмпирической функции  $y_n = y(x_n)$  определяется соотношением

$$D = \sup |y(x_n) - \mathcal{Y}(x | \theta)|, \quad (1)$$

При применении критерия Колмогорова необходимо сформулировать статистическую гипотезу  $H_0$ , заключающуюся в утверждении, что модельная

функция отклика  $\mathcal{Y}(x|\theta)$  совпадает с объективной, реальной зависимостью  $y = y(x)$ , что можно записать так

$$\text{гипотеза } H_0 : \mathcal{Y}(x|\theta) = y(x). \quad (2)$$

Если же гипотеза  $H_0$  неверна, т.е. справедлива альтернативная гипотеза  $H_1$ :  $\mathcal{Y}(x|\theta) \neq y(x)$ , то величина  $D$  будет положительной и не будет стремиться к нулю, т.е.  $D = \sup |y(x_n) - \mathcal{Y}(x|\theta)| > 0$ .

Колмогоровым было показано, что независимо от вида теоретической (модельной) функции от непрерывной случайной величины  $x$  в случае неограниченного увеличения числа независимых измерений  $N$  вероятность неравенства

$$D\sqrt{N} \leq \lambda \quad (3)$$

стремится к предельной вероятности, равной

$$p(\lambda) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} (-1)^i e^{-2i^2\lambda^2}. \quad (4)$$

Из (3) следует, что для больших значений  $\lambda$  вероятность реализации такого неравенства, т.е. вероятность  $p(\lambda)$ , велика. Если положить эту вероятность равной 0,95, то найденная экспериментально статистика  $D$  для адекватной модельной функции будет с такой же большой вероятностью заведомо удовлетворять неравенству (3). В свою очередь, вероятности  $p(\lambda) = 0,95$  соответствует квантиль распределения (4), равный  $\lambda_{0,95} = 1,39$ . Из сказанного следует, что если найденное из эксперимента критериальное значение  $\lambda_{ex} = D\sqrt{N}$  удовлетворяет условию  $\lambda_{ex} < \lambda_{0,95} = 1,39$ , то нулевая гипотеза  $H_0$  об адекватности модельной функции справедлива. Если же значение  $\lambda_{ex}$  превышает значение  $\lambda_{0,95}$ , то нулевая гипотеза  $H_0$  отвергается.

При практическом применении критерия А.Н. Колмогорова критериальный параметр  $\lambda_{ex}$  принимается равным

$$\lambda_{ex} = D\sqrt{N}. \quad (5)$$

Применение критерия Колмогорова при оценке адекватности модельных функций в методе калибровочных кривых сводится к выполнению следующей последовательности действий:

1. В реальном эксперименте получить эмпирическую зависимость  $y_n = y(x_n)$  выходного сигнала  $y_n$  от значений входного  $x_n$ .
2. С помощью экстраполяционной процедуры получить аналитическое выражение для эмпирической функции  $y(x_n)$ .
3. На основе анализа полученной экспериментальной информации и/или теоретических соображений предложить теоретическую (модельную) функцию, описывающую зависимость выходной реакции анализатора на входные воздействия.

4. Методом наименьших квадратов оценить значения параметров  $\theta$  модельной функции.
5. Графическим или программным образом из сравнения эмпирической и модельной функции найти значение величины  $D$ .
6. По формуле (5) вычислить значение критериального параметра  $\lambda_{ex}$  и сравнить его с критическим значением  $\lambda_{0,95}$  квантиля распределения.

Если найденное из эксперимента критериальное значение  $\lambda_{ex} = D\sqrt{N}$  удовлетворяет условию  $\lambda < \lambda_{0,95} = 1,39$ , то гипотезу  $H_0$  о соответствии экспериментальной функции модельной следует рассматривать как правдоподобную, не противоречащую опытным данным, а модельную функцию адекватной. В противном случае следует принять гипотезу  $H_1$ .

Для демонстрации возможностей вышеобозначенных критериев было рассмотрено применение нескольких модельных функций для описания экспериментальных зависимостей, полученных при проведении иммуносорбентного анализа ферментно связанных моноклональных антител и при определении концентрации бензодиазипина методом иммунохроматографии.

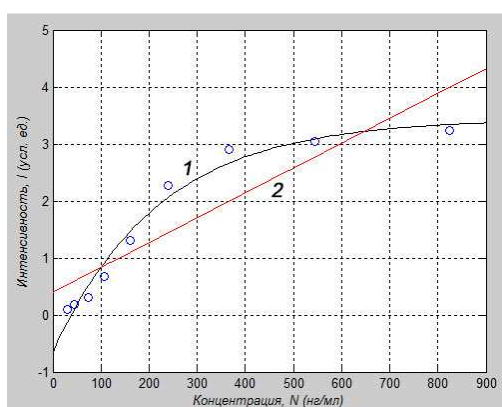


Рисунок 3 Модельные функции, построенные по экспериментальным данным

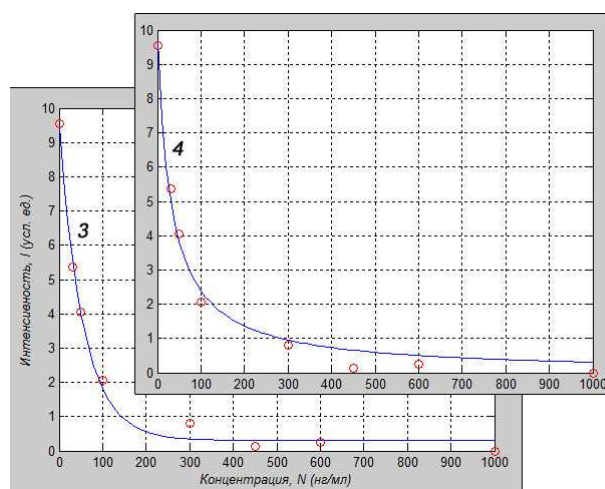


Рисунок 4  
Модельные функции, построенные по экспериментальным данным

Из этого перечня модельных функций только экспоненциальные функции имеют простейшее кинетическое обоснование. Из рисунков видно, что адекватные функции (кривые 1 и 3) действительно удовлетворяют всем используемым критериям. В то же время, для линейной функции (кривая 2),

обратно пропорциональной функции (кривая 4) и для некоторых других функций критерии, основанные на вычислении коэффициентов детерминации, не позволяют оценить ее неадекватность, в то время как критерий Колмогорова такие функции бракует.

Таблица 1

Модельные функции и параметры критериев

Модельная функция	Номер кривой на рисунке	Критерий Колмогорова ( $\lambda_{0,95} = 1,39$ )	$R^2$	$R^2_{\text{кор}}$	AIC	BIC
$y = \beta_0 + \beta_1(1 - e^{-\beta_2 x})$ $\beta_0 = -0.65 \quad \beta_1 = 4.09 \quad \beta_2 = 220.32$	1	$\lambda_{\text{ex}} = 0.73$ $\lambda_{\text{ex}} < \lambda_{0,95}$	0.99	0.97	-2.77	-0.99
$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$ $\beta_0 = -0.398 \quad \beta_1 = 0.004$	2	$\lambda_{\text{ex}} = 2.73$ $\lambda_{\text{ex}} > \lambda_{0,95}$	0.8	0.77	-0.73	1.27
$y = \beta_0 e^{-\beta_1 x} + \beta_2$ $\beta_0 = 9.14 \quad \beta_1 = 0.30 \quad \beta_2 = 0.02$	3	$\lambda_{\text{ex}} = 1.28$ $\lambda_{\text{ex}} < \lambda_{0,95}$	0.99	0.99	-2.07	-0.22
$y = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2 \cdot x}$ $\beta_0 = 9.65 \quad \beta_1 = 0.03$	4	$\lambda_{\text{ex}} = 1.52$ $\lambda_{\text{ex}} > \lambda_{0,95}$	0.99	0.99	-1.91	0.19

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что выбор того или иного метода тестирования ПО зависит, прежде всего, от возможности его применения. При наличии опорного ПО выбор метода сравнительного тестирования будет оптимальным. При отсутствии опорного ПО, а также возможности подачи на вход ПО (программный интерфейс) модельных («опорных») данных может быть выбран метод получения/генерации опорных данных.

На выбор методов также влияет и жесткость требований к испытаниям ПО СИ. При высокой жесткости, в большинстве случаев необходимо проводить структурное тестирование, т.е. тестированием с применением методов анализ исходного кода ПО. В зависимости от области применения ПО и используемых при его разработке математических алгоритмов возможно применение различных критериев оценки качества ПО.

**Третья глава** посвящена проверке программного обеспечения при испытаниях средств измерений с целью утверждения типа.

На основе нормативных документов был проведен анализ правового регулирования ПО СИ в РФ и выделены основные особенности ПО СИ, которые сводятся к следующему:

- использование ПО в СИ не должно приводить к искажению измерительной информации;
- ПО СИ должно быть защищено от преднамеренных и случайных изменений;



- ПО, используемое в конкретных СИ данного типа, должно идентифицироваться и полностью соответствовать ПО, установленному в СИ при испытаниях с целью утверждения типа.

Рассмотрена структура и содержание рекомендаций по метрологии Р 50.2.077-2014. «Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения». На Рисунке 3 приведены ее отличительные особенности.

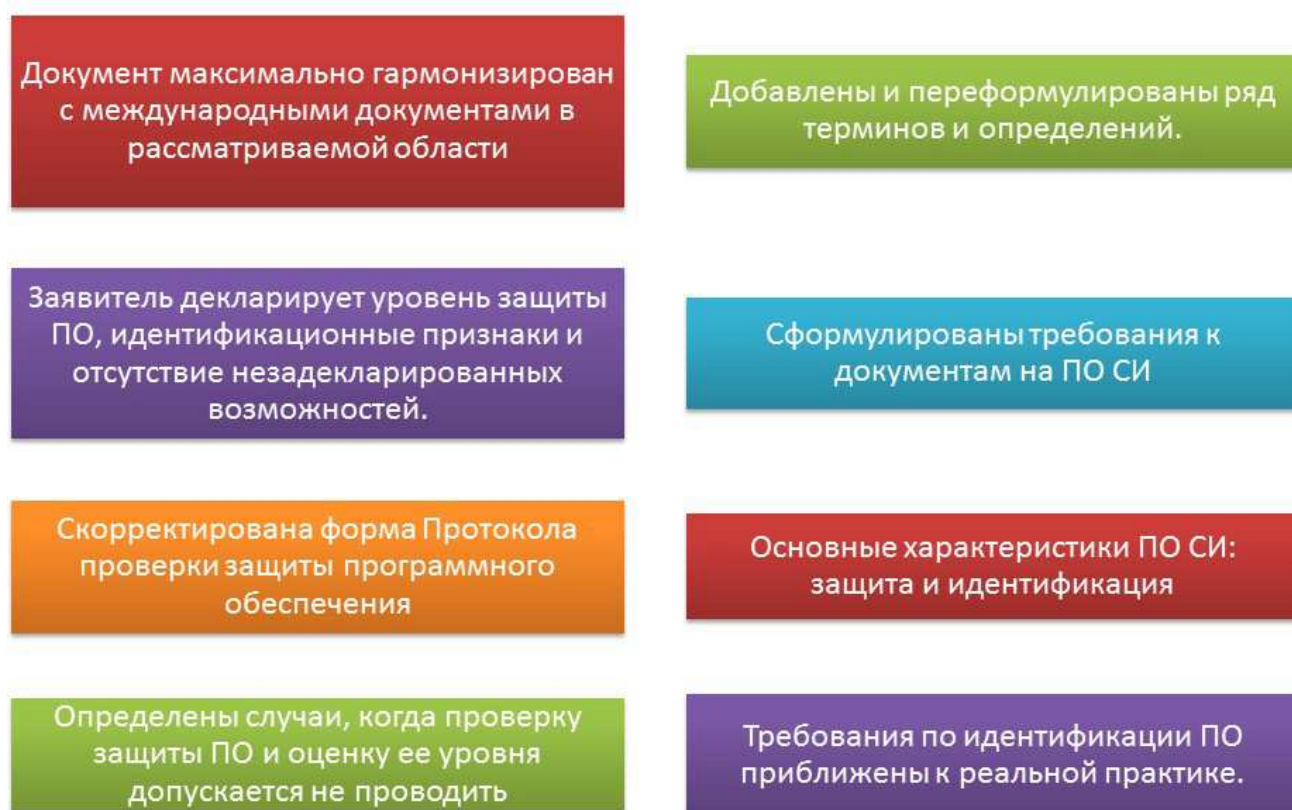


Рисунок 5.  
Отличительные особенности рекомендации Р 50.2.077-2014

Данный документ был разработан специалистами ФГУП «ВНИИМС» в рамках рабочей группы по программному обеспечению СИ, созданной Росстандартом РФ и в него вошла значительная часть наработок и результатов исследований, проведенных в рамках данной диссертационной работы.

Сформулированы основные отличительные особенности отечественного подхода к испытанию ПО СИ:

- разработчик (изготовитель, заявитель) должен декларировать уровень защиты программного обеспечения, а задача аккредитованной организации - провести



работу по установлению соответствия СИ заявленному уровню защиты ПО и зафиксировать это в описании типа СИ;

- основными характеристиками программного обеспечения, проверяемыми при испытаниях с целью утверждения типа СИ, являются уровень защиты и идентификация;
- допускаются случаи, когда проверку защиты ПО СИ и оценку ее уровня допускается не проводить;
- разработчик (изготовитель, заявитель) должен декларировать отсутствие недокументированных возможностей ПО, полноту представленной документации.

Сформулированы выводы относительно текущего состояния состояние нормативной базы в области законодательно контролируемого программного обеспечения:

- рекомендация Р 50.2.077-2014 отражает основные особенности национального подхода к тестированию программного обеспечения технических средств, входящих в сферу государственного регулирования в области обеспечения единства измерений, при этом, она максимально гармонизирована с международными рекомендациями, относящимися к программному обеспечению средств измерений: документом МОЗМ D31 и рекомендацией WELMEC 7.2.
- рекомендации Р 50.2.077-2014 стали заключительным звеном в цепочке документов, состоящих из методик институтов, рекомендаций и национальных стандартов, определяющих требования к ПО СИ, процедуре их оценки и тестированию.
- текущее состояние нормативной базы в области законодательно контролируемого программного обеспечения позволяет проводить оценку ПО СИ с учетом передового мирового опыта в данной области и при этом учитывать специфику Российского законодательства со своими особенностями.

**В четвертой главе** проведена апробация рассмотренных в диссертационной работе требований, методов и методик испытаний ПО СИ на примере разработки опорного программного продукта для целей тестирования технических средств и ПО СИ, функционирующих в соответствии с протоколом IEC 61850-9-2 и дополнительными рекомендациями МЭК 61850-9-2LE.

Рассмотрены особенности применяемых стандартов. В соответствии с ГОСТ Р 8.654-2009 (ГОСТ Р 8.654-2015) установлены требования к опорному ПО:

- документации;
- разделению программного обеспечения;
- идентификации программного обеспечения;
- защите программного обеспечения и данных;
- интерфейсу пользователя;
- синхронизации данных и обнаружению потерь;
- структуре Ethernet кадра для приема SV сообщений.

Приведено описание опорного программного продукта, его функций и интерфейсов. Описана процедура оценки вычислительных возможностей программных продуктов с использованием опорного ПО. (тестирование проводилось на реальных массивах данных измерений, полученных от компаний ООО «Систел», ООО «Компания ДЭП» и ООО «ЭнергопромАвтоматизация», а также генераторах цифровых SV сообщений Volcano и iMerge).

Описаны этапы проведения оценки, структурная схема (Рисунок 6) испытательного стенда и результаты испытаний Таблица 2

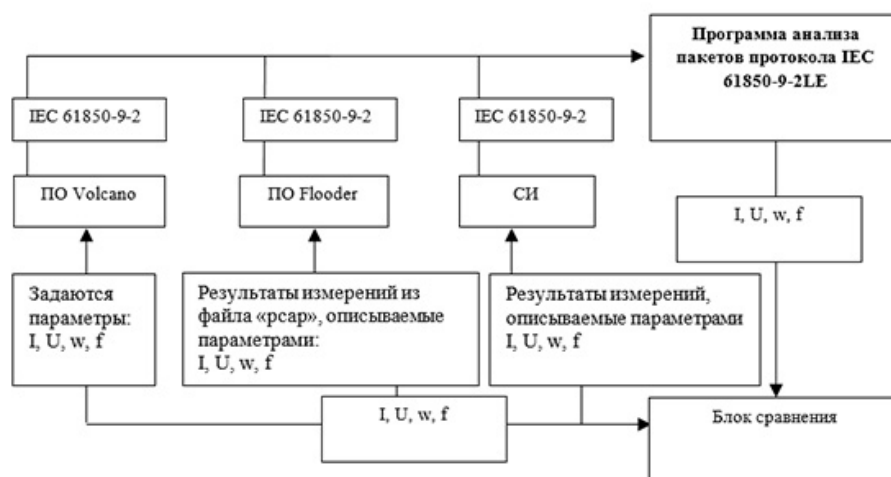


Рисунок 6

Структурная схема испытательного стенда

Таблица 2

ООО «Теквел», Volcano, SV80	Опорное ПО	Относительное расхождение, %
$I_A = 1000 \text{ A}$ $U_A = 63500 \text{ В}$ $\omega_A = 50 \text{ Гц}$ $\phi_{A0} = 1.047197551 \text{ рад}$	$I_A = 999,999593 \text{ A}$ $U_A = 63499,994968 \text{ В}$ $\omega_A = 49,999999999998806 \text{ Гц}$ $\phi_{A0} = 1.046878141 \text{ рад}$	0,00004070001656447 0,00000792441007826 0,0000000000240163 0,03051071442706810
ООО «Теквел», iMerge, SV80		
$I_A = 1000 \text{ A}$ $U_A = 110000 \text{ В}$ $\omega_A = 50 \text{ Гц}$ $\phi_{A0} = 0,5235987760 \text{ рад}$	$I_A = 999,999593 \text{ A}$ $U_A = 109999,996102 \text{ В}$ $\omega_A = 50,000000000009479 \text{ Гц}$ $\phi_{A0} = 0,5231536660 \text{ рад}$	0,00004070001656447 0,00000354363648502 0,00000000001880096 0,08508207605679400
ООО «Компания ДЭП», SV 80		
$I_A = 5 \text{ A}$ $U_A = 100 \text{ В}$ $\omega_A = 50 \text{ Гц}$ $\phi_{A0} = 1,832595715 \text{ рад}$	$I_A = 4,998652 \text{ A}$ $U_A = 100,010244 \text{ В}$ $\omega_A = 49,997491649562726 \text{ Гц}$ $\phi_{A0} = 1,832985405 \text{ рад}$	0,02696727037609590 0,01024295071212920 0,00501695256010878 0,02125983103968060
ООО «Систел», SV 256		
$U_A = 220 \text{ В}$ $\omega_U = 50 \text{ Гц}$ $\phi_{U0} = 1,570796327 \text{ рад}$	$U_A = 219,995601 \text{ В}$ $\omega_U = 50,000000004993794 \text{ Гц}$ $\phi_{U0} = 1,5707963286 \text{ рад}$	0,00199958543716812 0,0000000998740290 0,00000010185915775
ООО «Систел», SV80		
$U_A = 220 \text{ В}$ $\omega_U = 50 \text{ Гц}$ $\phi_{U0} = 1,570796327 \text{ рад}$	$U_A = 219,895029 \text{ В}$ $\omega_U = 50,0000009633535 \text{ Гц}$ $\phi_{U0} = 1,5707963335 \text{ рад}$	0,04773686812174650 0,00000192670696304 0,00000041380284210

Для задач оценки качества подбора значений модельно-зависимых параметров при применении моделей интерполяции в опорном ПО было предложено использовать метод кросс-валидации в совокупности с количественным критерием оценки качества.

Метод основан на проведении оценки для части данных, выбранных из основного набора по остальным данным с последующим вычислением ошибки оценки. После оценок по всем наборам или выборкам оценивается среднее значение полученных оценок. По нему сравниваются различные методы или выбираются наилучшие параметры модели. Процедура кросс-валидации сводится к следующему:

Исходная выборка разбивается N различными способами на две непересекающиеся подвыборки  $X^L = X_n^m \cup X_n^k$ , где:

$X_n^m$  - обучающая подвыборка длины m,

$X_n^k$  - контрольная подвыборка длины k = L - m, n=1,...,N - номер разбиения.

Далее, для каждого разбиения n строится алгоритм

$$a_n = f(c_i, X_n^m),$$

$$b_n = f(c_j, X_n^k), \text{ где } c_i \text{ и } c_j \text{ наборы параметров модели}$$

вычисляется значение функционала качества  $Q_n = Q(a_n, b_n)$ .

В качестве количественного критерия оценки качества используется относительное расхождение между параметрами модели, описывающими на n-ом разбиении обучающую и контрольную подвыборки.

На примере генератора SV сообщений, разработанного компаний ООО «Компания ДЕП», было продемонстрировано применение метода K-кратной кросс-валидации (Рисунок 7) для оценки качества подбора значений модельно-зависимых параметров при разработке опорного ПО для тестирования ПО СИ цифровых подстанций.

	Блок 1	Блок 2	...	...	Блок K-1	Блок K	
	Обучающая подвыборка					Контрольная подвыборка	Точность
Шаг 1	Блок 1	Блок 2	...	...	Блок K-1	Блок K	$Q_1$
Шаг 2	Блок 1	Блок 2	...	...	Блок K-1	Блок K	$Q_2$
	.	.	.	.	.	.	
	.	.	.	.	.	.	
Шаг K-1	Блок 1	Блок 2	...	...	Блок K-1	Блок K	$Q_{K-1}$
Шаг K	Блок 1	Блок 2	...	...	Блок K-1	Блок K	$Q_K$
Итоговая оценка точности $\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K Q_K$							

На основании проведенных испытаний сделаны выводы о правильности реализации опорного ПО и его пригодности для использования в качестве инструмента при подтверждении соответствия ПО.

## **ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

Проведенные исследования показали возможность и целесообразность применения новым методов тестирования СИ, в частности его программной составляющей с целью обеспечения доверия к результатам измерений, полученными средствами измерений.

Изучение литературных источников, нормативной и технической документации показали перспективность создание новых технических и нормативно-методических решений, обеспечивающих повышение качества испытаний СИ и его программной составляющей.

В результате проведенных исследований был обоснован оптимальный набор требований к ПО СИ и разработана рекомендация по метрологии Р 50.2.077-2014, отражающая особенности национального подхода к тестированию программного обеспечения технических средств, входящих в сферу государственного регулирования в области обеспечения единства измерений и максимально гармонизированная с международными рекомендациями, относящимися к программному обеспечению средств измерений.

Кроме того, были разработаны два национальных стандарта ГОСТ Р 8.654-2015, ГОСТ Р 8.883-2015 и ряд методик института, устанавливающих требования к ПО СИ цифровых подстанций.

Обоснована возможность применения критерия Колмогорова для оценки качества ПО СИ для задач, связанных с отбраковкой неадекватных модельных функций.

Был разработан и опробован метод проверки программного обеспечения, основанный на использовании метода кросс-валидации и количественного критерия оценки качества ПО.

Было разработано «опорное» ПО для целей тестирования ПО СИ, осуществляющих генерацию и/или передачу выборок результатов измерений мгновенных значений измерений тока и напряжения в соответствии с стандартом МЭК 61850-9-2LE. Разработка и тестирование «опорного» ПО осуществлялась с учетом требований к ПО СИ.

Результаты испытаний «опорного» ПО отражают правильность его реализации и пригодность для использования в качестве инструмента при подтверждении соответствия ПО СИ. Тестирование и опробование «опорного» ПО проводилось на реальных массивах данных измерений, полученных от компаний ООО «Систел», ООО «Компания ДЭП» и ООО «ЭнергопромАвтоматизация».

Разработанные рекомендации, стандарты и методики успешно используются при разработке ПО СИ и проведении испытаний СИ с целью

утверждения типа. «Опорное» ПО применяется как инструмент тестирования ПО в рамках работ, проводимых в СДС ПО СИ ФГУП «ВНИИМС».

### **3. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации:**

1. Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Структура и особенности Руководства WELMEC 7.2 (The Structure and Features of Guidance WELMEC 7.2) // Измерительная техника. 2008. №5. С. 69 – 72,

2. Козлов М.В., Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Тестирование программного обеспечения средств измерений и информационно-измерительных систем // Приборы. 2009. №3,

3. Паньков А.Н. Подтверждение соответствия программного обеспечения. Сертификация и аттестация программного обеспечения. Система добровольной сертификации программного обеспечения // Приборы. 2015. №1. С. 26 – 28,

4. Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Новая редакция рекомендаций по метрологии Р 50.2.077-2014 // Приборы. 2015. №1. С. 29 – 33,

5. Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Критерии оценки адекватности аппроксимирующих функций в методе калибровочных кривых // Измерительная техника. 2015. №7. С. 43 – 46.

#### **Публикации в иных рецензируемых научных изданиях:**

6. Дудыкин А.А., Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Проблемы аттестации встроеного программного обеспечения средств измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2007. №4 С. 22 – 26.

7. Акимов А.А., Козлов М.В., Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н., Раевский И.А., Стефанов А.Ю., Стефанов Ю.В. Стенд для тестирования (испытаний) программного обеспечения средств измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2008. №6. С. 25 – 27.

8. Бурдунин М.Н., Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Оценка качества ПО счетчика - расходомера РМ-5 и счетчика количества теплоты КМ-5 // Главный метролог. 2007. №3. С. 32 – 39.

9. WELMEC 7.2. Руководство по программному обеспечению (основано на Директиве по измерительным приборам 2004/22/ЕС). – М.: АНО «РСК-Консалтинг», 2009. – 183 с.

10. Акимов А.А., Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Еще раз о проверке программного обеспечения средств измерений в целях утверждения типа // Законодательная и прикладная метрология. 2011. №2. С. 38 – 43.

11. Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Новая редакция рекомендации по метрологии Р 50.2.077-2013 // Законодательная и прикладная метрология. 2014. №2. С. 13 – 16.

12. Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Критерии выбора аппроксимирующих функций в методике градуировочных характеристик (Criteria for selection of

approximating functions in the method of calibration curves) // Законодательная и прикладная метрология. 2014. №6. С. 22– 27.

13. Кудеяров Ю.А., Паньков А.Н. Criteria for Assessing the Adequacy of Approximating Functions in the Method of Calibration Curves // Measurement Techniques, издательство Instrument Society of America (United States), том 58, № 7

14. Кудеяров Ю.А., Паньков, Стефанов Ю.В. Аттестация программного обеспечения средств измерений // Компетентность. 2009. №3. С. 22 – 28.

15. Ю.А. Кудеяров, А.Н. Паньков. Испытания ПО СИ методом перекрестной проверки (кросс-валидации). Главный метролог, №6, 2016, 12-14.

16. В.В. Киселев, Ю.А. Кудеяров, А.Н. Паньков Нормативные основы тестирования технических средств, осуществляющих передачу мгновенных значений измерений в соответствии с серией стандартов МЭК 61850 (ФГУП «ВНИИМС»). Журнал Законодательная и прикладная метрология. №6, 2015. С. 18-24