

*На правах рукописи*



Крупская Анна Вячеславовна

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ  
С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ САМОКОНТРОЛЕМ**

Специальность 05.11.16 – Информационно-измерительные  
и управляющие системы (приборостроение)

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре информационно-измерительных систем и технологий.

Научный руководитель – **Королев Павел Геннадьевич**  
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бегунов Александр Андреевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Системы менеджмента»  
Федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения дополнительного  
профессионального образования «Санкт-  
Петербургский институт управления и пищевых  
технологий» (ФГБОУ ДПО «СПИУПТ»)

**Гусеница Ярослав Николаевич**  
кандидат технических наук, преподаватель  
кафедры метрологического обеспечения  
вооружения, военной и специальной техники  
Федерального государственного бюджетного  
военного образовательного учреждения высшего  
образования «Военно-космическая академия  
имени А.Ф. Можайского» Министерства  
обороны Российской Федерации (ВКА имени  
А.Ф. Можайского)

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Тамбовский государственный  
технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»),  
г. Тамбов

Защита состоится «14» декабря 2017 года в 14.00 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского  
государственного электротехнического университета «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург,  
ул. Профессора Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на  
сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru).

Автореферат разослан «13» октября 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.06,  
кандидат технических наук, доцент



А.А. Великосельцев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Средства измерений (СИ) применяются во всех сферах деятельности человека. Несоответствие результатов измерений действительным значениям измеряемой физической величины может иметь негативные последствия независимо от области применения СИ. Любое СИ имеет тенденцию к деградации со временем его метрологических характеристик (МХ). Для подтверждения соответствия СИ метрологическим требованиям проводится процедура поверки, результаты которой могут подтвердить метрологическую исправность СИ в момент проведения поверки и не могут гарантировать метрологическую исправность СИ на предстоящем межповерочном интервале (МПИ). Информация о метрологическом отказе, полученная при проведении текущей поверки, свидетельствует о том, что результаты измерений, полученные на межповерочном интервале с помощью поверяемого СИ, нельзя считать достоверными. Такие случаи недопустимы для изделий, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. Предотвратить указанные ситуации и повысить достоверность измерительной информации возможно для СИ, имеющих в своем составе встроенную подсистему коррекции и регистрации результатов калибровочных измерений. К ним относятся СИ с функцией метрологического самоконтроля. Согласно ГОСТ 8.673-2009 «ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Термины и определения» под метрологическим самоконтролем понимается автоматическая проверка метрологической исправности измерительного канала в процессе его эксплуатации, осуществляемая с использованием принятого опорного значения, формируемого с помощью встроенного средства (измерительного преобразователя или меры). Функция метрологического самоконтроля могла бы заменить процедуру поверки, но метрологическую исправность первичного измерительного преобразователя или меры, используемой в качестве источника образцовых сигналов, тоже необходимо контролировать. Организация такого контроля возможна только при проведении поверки. Наделение СИ с метрологическим самоконтролем функцией регистрации результатов калибровочных измерений предоставит возможность прогнозирования наступления метрологического отказа СИ на предстоящем периоде эксплуатации. Обработка результатов поверки совместно с результатами определения погрешности в соответствующие моменты времени на межповерочном интервале, накопленная в памяти СИ, позволяет рассчитать значения погрешности на предстоящее время эксплуатации и определить, будет ли СИ метрологически исправно на очередном МПИ.

В работе показана возможность обеспечения метрологической исправности СИ с метрологическим самоконтролем на последующих межповерочных интервалах. Задача разработки алгоритмического обеспечения СИ с функцией метрологического самоконтроля, позволяющего по накопленной в процессе эксплуатации информации об изменении характеристик погрешности прогнозировать метрологическую исправность, является актуальной.

**Целью диссертации** является разработка алгоритмического обеспечения средств измерений с функцией метрологического самоконтроля и регистрацией результатов работы подсистемы коррекции, позволяющего прогнозировать их метрологическую исправность на предстоящем межповерочном интервале.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ современного состояния системы метрологического обеспечения в части назначения межповерочных интервалов СИ.

2. Сформулированы требования к выбору калибровочных точек, формируемых источником образцовых сигналов, для контроля погрешности в процессе эксплуатации.

3. Разработан алгоритм принятия решения о необходимости коррекции характеристики преобразования в процессе эксплуатации при недостаточности априорных знаний о законе распределения.

4. Разработан алгоритм прогнозирования изменения характеристик погрешности для СИ с метрологическим самоконтролем в течение последующих межповерочных интервалов.

5. Разработана процедура применения алгоритмов для прогнозирования состояния СИ с метрологическим самоконтролем.

**Объект исследования:** измерительный канал с метрологическим самоконтролем и регистрацией результатов работы подсистемы коррекции.

**Предмет исследования:** возможность обеспечения метрологической исправности СИ на последующих межповерочных интервалах.

**Научная задача**, решаемая в диссертационной работе, заключается в математическом обосновании и построении алгоритмов, обеспечивающих применение метрологически исправных средств измерений.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач в работе использовались аппарат теории вероятностей и математической статистики, методы системного анализа и прогнозирования временных рядов.

**Научная новизна.** В процессе проведения исследований получены новые научные результаты:

1. Впервые разработан алгоритм обработки выборок результатов измерений, позволяющий принимать статистически обоснованное решение о необходимости коррекции характеристики преобразования в процессе эксплуатации, отличающийся возможностью обрабатывать выборки различного объема при недостаточности априорных знаний о законе распределения.

2. Для СИ с метрологическим самоконтролем разработан алгоритм получения данных при калибровках и поверках, предоставляющий возможность прогнозирования метрологической исправности СИ.

3. Разработан алгоритм прогнозирования изменения характеристик погрешности, заключающийся в совместной обработке результатов поверки и калибровочных измерений.

**Практическая значимость** диссертации состоит в том, что разработанное алгоритмическое обеспечение позволит гарантировать метрологическую исправность СИ с метрологическим самоконтролем на

предстоящем межповерочном интервале с заданной вероятностью, что особенно важно для СИ, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений.

**Внедрение результатов диссертации.** Результаты работы были использованы при выполнении проекта «Проведение прикладных исследований, направленных на создание интеллектуальной информационно-измерительной системы комплексной безопасности участка обращения локомотива» при поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», а также внедрены в ООО «Инертех» и АО «РИРВ».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм на основе непараметрического рангового критерия позволяет принимать статистически обоснованное решение о введении коррекции при законе распределения случайной составляющей погрешности, отличном от нормального.

2. Алгоритм получения данных при калибровках и поверках дает возможность прогнозировать метрологический отказ СИ на очередном межповерочном интервале.

3. Алгоритм прогнозирования изменения характеристик погрешности для СИ с метрологическим самоконтролем за счет использования результатов работы подсистемы коррекции, основанный на обработке выборки различного объема и с законом распределения, отличным от нормального, позволяет прогнозировать вероятность наступления метрологического отказа СИ на установленном интервале.

**Апробация.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня: Международном конгрессе «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов» научно-практической конференции «Геополитические факторы устойчивого развития Арктики и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций» (Санкт-Петербург, 2012 г.), Международной интернет-конференции «Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие» (Ижевск, 2014 г.), Научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (Санкт-Петербург, 2013, 2014, 2015, 2017 гг.), международной Конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники (EIconRusNW) (Санкт-Петербург, 2015, 2016 гг.), VIII Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (Санкт-Петербург, 2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, 7 публикаций в сборниках трудов конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 72 наименования, и трех приложений. Основной текст изложен на 110 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 17 таблиц. Приложения изложены на 13 страницах, содержат 11 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлены результаты анализа современного состояния системы метрологического обеспечения средств измерений в области назначения МПИ, рассмотрены математические модели изменения МХ и методы корректировки МПИ СИ.

Межповерочный интервал устанавливается при внесении СИ в Государственный реестр средств измерений в ходе испытаний в целях утверждения типа. Решение об утверждении типа СИ и корректировке МПИ принимается федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим функции по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в области обеспечения единства измерений – Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии. Методы определения МПИ СИ изложены в Рекомендациях по межгосударственной стандартизации РМГ 74-2004 «ГСИ. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений» и основаны на моделировании процессов дрейфа погрешности СИ нормальным распределением.

Согласно действующей нормативной базе в области установления межповерочных интервалов для СИ одного типа назначается единый МПИ, при этом не учитываются модель дрейфа изменения погрешности, условия эксплуатации СИ, отсутствует информация о состоянии погрешности в любой момент эксплуатации. Допуск к эксплуатации СИ с низкой метрологической надежностью и метрологический отказ СИ на предстоящем МПИ приводят к потерям от использования метрологически неисправных СИ. Таким образом, очевидна необходимость прогнозирования метрологической исправности экземпляров СИ на предстоящем МПИ.

Для прогнозирования метрологической исправности на предстоящий МПИ необходимо иметь информацию об изменении характеристик погрешности на предыдущем периоде эксплуатации СИ. Представляется целесообразным разработать алгоритм прогнозирования изменения погрешности конкретного экземпляра СИ на основе обработки данных, накопленных в процессе эксплуатации в памяти СИ, совместно с результатами поверки. Такой подход позволит гарантировать метрологическую исправность экземпляра СИ на предстоящем МПИ.

**Во второй главе** описаны структурные решения СИ с функцией метрологического самоконтроля; предложены алгоритмы работы СИ, позволяющие принимать статистически обоснованное решение о коррекции характеристики преобразования, как при нормальном законе распределения случайной составляющей погрешности, так и при отсутствии информации о законе распределения; рассмотрены основные статистические методы прогнозирования временных рядов, осуществлен выбор метода для прогнозирования изменения погрешности СИ.

В зависимости от схемотехнических, алгоритмических и конструктивных решений построения основного измерительного канала СИ, а также условий применения и воздействующих дестабилизирующих факторов возможно несколько решений по месту формирования образцовых сигналов. На рисунке 1 представлена структурная схема СИ для случая, когда образцовый сигнал формируется на входе первичного измерительного преобразователя, на рисунке 2 – для случая, когда формирование образцового воздействия происходит на входе нормирующего преобразователя, например, для измерения неэлектрической физической величины (в частности, температуры).

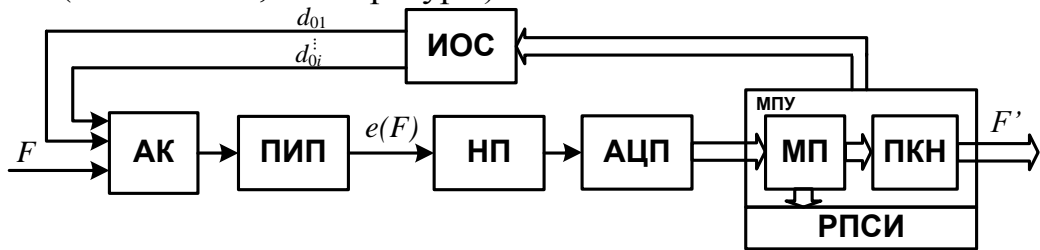


Рисунок 1 – Структурная схема СИ  
(образцовый сигнал формируется на входе первичного измерительного преобразователя)

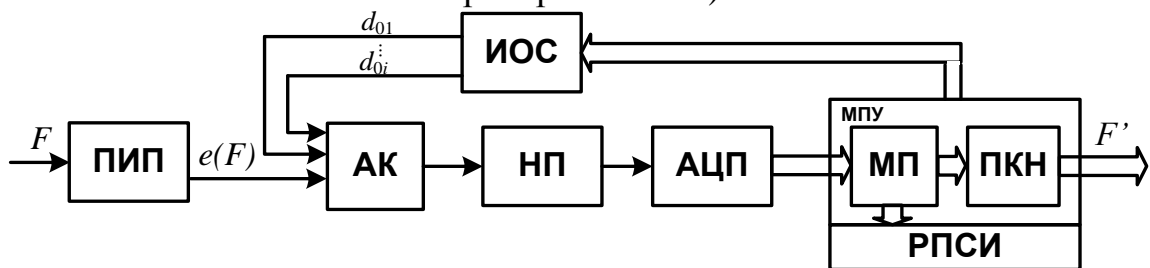


Рисунок 2 – Структурная схема СИ  
(образцовый сигнал формируется на входе нормирующего преобразователя)

В состав канала входят: АК – аналоговый коммутатор, ПИП – первичный измерительный преобразователь, НП – нормирующий преобразователь, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ИОС – источник образцовых сигналов, МПУ – микропроцессорное устройство, состоящее из масштабирующего преобразователя (МП) и преобразователя компенсации нелинейности (ПКН), РПСИ – регистратор параметров СИ (вычислительное устройство с энергонезависимой памятью для регистрации результатов работы подсистемы коррекции). На рисунках 1 и 2 введены следующие обозначения:  $F$  – входной сигнал,  $e(F)$  – сигнал на выходе ПИП, описываемый функциональной зависимостью от входного сигнала,  $d_{01} \dots d_{0i}$  – образцовые сигналы,  $F'$  – именованное значение физической величины на выходе канала.

Для контроля метрологической исправности СИ в процессе эксплуатации оцениваются погрешность и скорость ее изменения. При превышении погрешности допустимого значения производится коррекция характеристики преобразования – корректируются коэффициенты полинома, описывающие характеристику преобразования.

Калибровочные точки выбираются с учетом характера нелинейности характеристики преобразования, при этом в их число включают точки, в которых ожидаются наибольшие значения погрешности, а также точки, соответствующие нижнему и верхнему пределам диапазона измерений.

Определение промежуточных точек (в которых ожидаются наибольшие значения погрешности) осуществляется с помощью функции от производной функции преобразования ПИП  $e(F)$ :

$$\Delta F = f \left( \frac{de(F)}{df} \right). \quad (1)$$

На рисунке 3 представлена блок-схема алгоритма обработки калибровочных измерений в процессе эксплуатации.

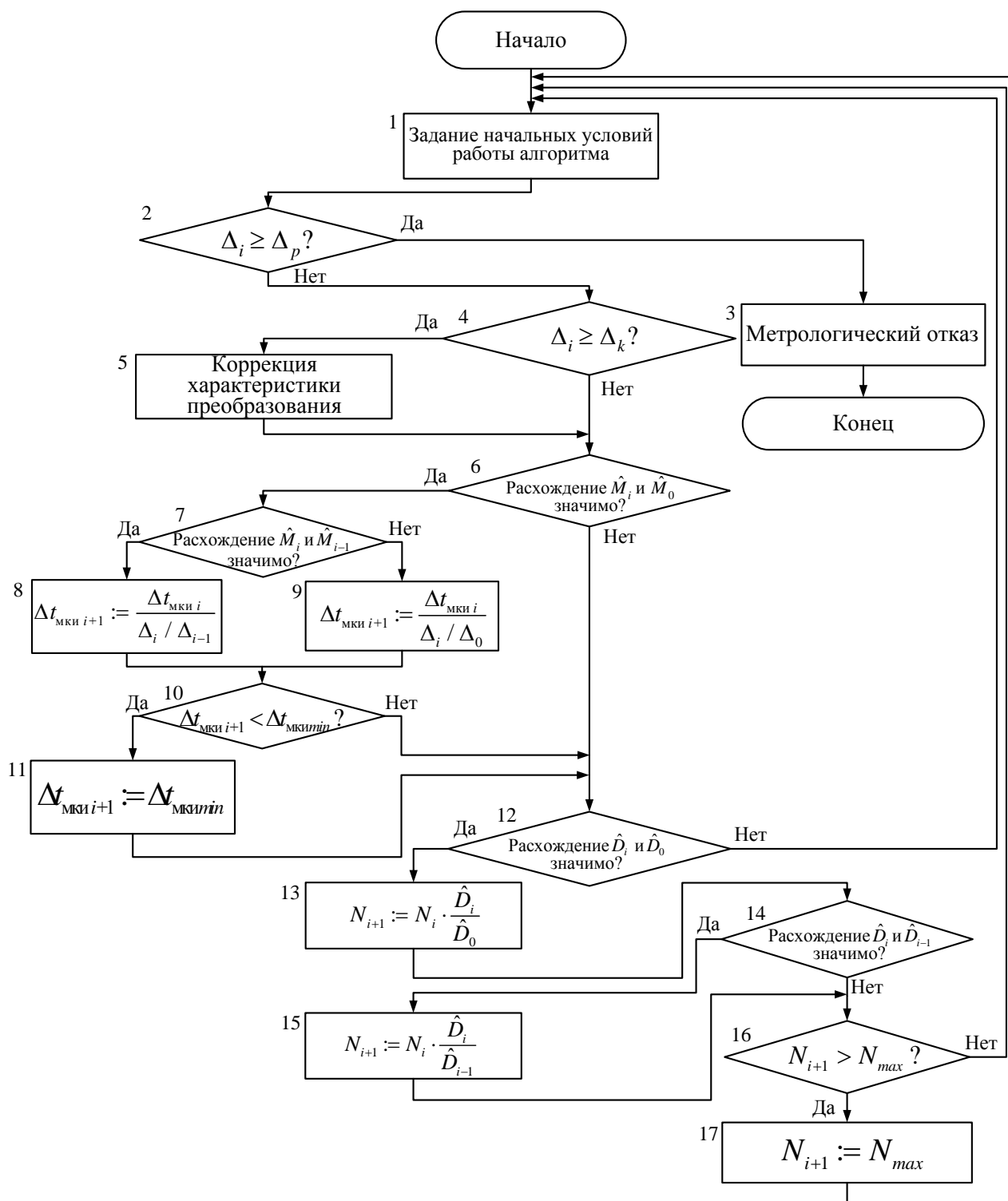


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритма обработки калибровочных измерений в процессе эксплуатации



Для определения параметров дрейфа погрешности в процессе эксплуатации проводится проверка значимости расхождения математических ожиданий и дисперсий: полученные в момент текущей калибровки  $t_i$  значения параметров сравниваются со значениями, полученными в момент нулевой настройки  $t_0$ , а также со значениями, полученными во время предыдущей калибровки  $t_{i-1}$ . Под «нулевой настройкой» понимается подготовка СИ к эксплуатации, в процессе которой устанавливаются и фиксируются в памяти СИ начальные значения параметров работы его подсистемы автоматической коррекции.

В процессе эксплуатации осуществляется контроль значения погрешности. Если погрешность результатов измерений, проведенных при  $i$ -й калибровке,  $\Delta_i$  превысила допустимые пределы погрешности  $\Delta_p$ , то это свидетельствует о метрологическом отказе СИ. В случае невыполнения неравенства  $\Delta_i \geq \Delta_p$ , алгоритм переходит к проверке неравенства  $\Delta_i \geq \Delta_k$ . При  $\Delta_i \geq \Delta_k$  производится коррекция характеристики преобразования – корректируются коэффициенты полинома, описывающие характеристику преобразования. (Уровень погрешности  $\Delta_k$  задается при проектировании СИ).

При значимом расхождении математических ожиданий сравниваемых выборок межкалибровочный интервал  $\Delta t_{\text{МКИ}}$  изменяется пропорционально скорости изменения погрешности. В случае значимого расхождения дисперсий количество калибровочных измерений  $N$  в следующий  $(i+1)$ -й момент проведения калибровки изменяется пропорционально изменению дисперсий.

При условии значительного вклада случайной составляющей погрешности принятие решения о коррекции характеристики преобразования должно быть статистически обоснованным. Выборки результатов калибровочных измерений в зависимости от их объема можно разделить на два типа: выборки большого объема ( $N > 30$ ), когда имеется возможность проведения длительных калибровочных измерений, и выборки малого объема ( $N \leq 30$ ), когда возможность накапливать выборки большого объема отсутствует.

В первом случае, а также когда закон распределения случайной составляющей погрешности известен и имеет нормальное распределение, для оценивания значимости расхождения параметров сравниваемых выборок используют классические критерии проверки гипотез о равенстве математических ожиданий и дисперсий. Во втором случае, когда проверка «недостижения» погрешности допустимых пределов проводится в небольшом количестве контрольных точек диапазона измерения, и количество измерений в каждой выборке невелико ( $N \leq 30$ ), возникает проблема малой выборки. Кроме того, закон распределения случайной составляющей погрешности может быть неизвестен или отличаться от нормального. При указанных обстоятельствах (закон распределения неизвестен или отличен от нормального, отсутствует возможность накапливать выборки результатов измерений большого объема, неравные объемы выборок) для сравнения параметров выборок применяются

непараметрические ранговые критерии. Непараметрические ранговые критерии позволяют сравнивать выборки различного объема, в том числе малого, при законах распределения случайной составляющей погрешности, отличных от нормального, или при отсутствии информации о законе распределения.

Разработанный алгоритм работы СИ с функцией метрологического самоконтроля позволяют обоснованно корректировать характеристику преобразования СИ в процессе эксплуатации, в том числе при недостаточности априорных знаний о законе распределения случайной составляющей погрешности.

К основным статистическим методам прогнозирования относятся: метод наименьших квадратов, взвешенный метод наименьших квадратов, метод экспоненциального сглаживания, метод скользящих средних, метод авторегрессии. Анализ рассмотренных методов показал, что одним из подходящих методов для прогнозирования изменения погрешности является метод авторегрессии, который в отличие от других методов прогнозирования позволяет учитывать как систематическую, так и случайную составляющие погрешности.

Для погрешности конкретного экземпляра СИ  $\Delta(t)$  можно записать:

$$\Delta(t) = \Delta_s(t) + \overset{\circ}{\Delta}(t), \quad (2)$$

где  $\Delta_s$  – систематическая составляющая погрешности конкретного экземпляра СИ,  $\overset{\circ}{\Delta}$  – случайная составляющая погрешности конкретного экземпляра СИ.

Значения систематической составляющей погрешности находят с использованием метода наименьших квадратов, подставляя в уравнение модели изменения погрешности соответствующие значения времени. Случайная составляющая определяется как разность между экспериментальными значениями погрешности и значениями систематической составляющей погрешности, найденными расчетом по модели:

$$\overset{\circ}{\Delta}(t) = \Delta(t) - \Delta_s(t). \quad (3)$$

Для прогнозирования погрешности необходимо произвести прогнозирование систематической и случайной составляющих, после чего их результаты объединить:

$$\Delta(t_i + \tau) = \Delta_s(t_i + \tau) + \overset{\circ}{\Delta}(t_i + \tau). \quad (4)$$

Однако применение метода авторегрессии требует выполнения ряда условий (случайная компонента является стационарным в широком смысле случайным процессом, независима от времени, имеет нормальный закон распределения с нулевым математическим ожиданием; отсутствует автокорреляция в ряду отклонений от расчетных значений, полученных по авторегрессионной модели). При невыполнении указанных условий для прогнозирования изменения погрешности целесообразно применять метод наименьших квадратов.

В третьей главе рассмотрены различные случаи изменения во времени характеристик погрешности СИ с функцией метрологического самоконтроля; разработан алгоритм получения данных, которые необходимо регистрировать в памяти СИ для прогнозирования метрологической исправности СИ на очередных МПИ; предложен алгоритм прогнозирования изменения характеристик погрешности на основе обработки результатов, накопленных в подсистеме коррекции СИ, совместно с результатами поверки.

Для СИ с функцией метрологического самоконтроля возможны следующие случаи изменения погрешности во времени:

1) Значения погрешности  $\Delta$  в калибровочных точках не превышают значения  $\Delta_k$ , при достижении которого происходит коррекция характеристики преобразования ( $\Delta < \Delta_k$ ), дрейф практически отсутствует (скорость дрейфа  $v \rightarrow 0$ ), межкалибровочный интервал (МКИ) остается постоянным на всём межповерочном интервале ( $\Delta t_{\text{МКИ}} = \text{const}$ ). Пример такой ситуации демонстрирует рисунок 4.

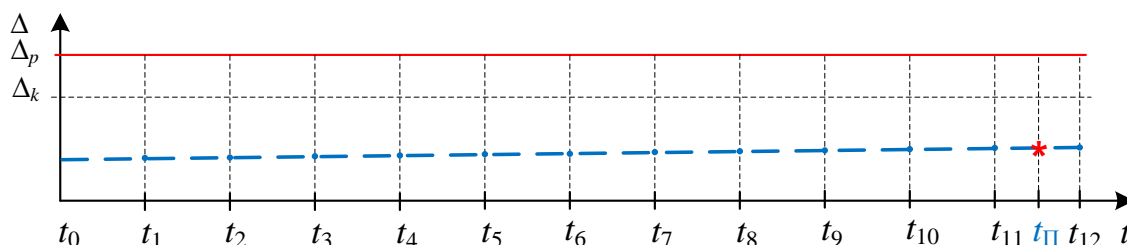


Рисунок 4 – Первый случай изменения погрешности СИ во времени

Под скоростью дрейфа погрешности  $v$  понимается скорость изменения погрешности  $\Delta$  за межкалибровочный интервал  $\Delta t_{\text{МКИ}}$ :

$$v = \frac{\Delta}{\Delta t_{\text{МКИ}}}. \quad (5)$$

Допустимая скорость дрейфа погрешности – это такая скорость изменения погрешности  $\Delta$ , при которой она не превышает значение  $\Delta_k$  за межкалибровочный интервал  $\Delta t_{\text{МКИ}}$ :

$$v_{\text{доп}} = \frac{\Delta_k}{\Delta t_{\text{МКИ}}}. \quad (6)$$

Значение  $\Delta_k$  связано со значением допускаемых пределов погрешности  $\Delta_p$ , при которых СИ признается еще годным к применению, выражением:

$$\Delta_k = k \cdot \Delta_p, \quad (7)$$

где значение коэффициента  $k$  устанавливается на стадии разработки СИ из ряда  $k \in [0,2 \div 0,8]$ .

2) Погрешность изменяется со скоростью, не превышающей допустимую ( $v \leq v_{\text{доп}}$ ), значения погрешности не превышают допустимые ( $\Delta \leq \Delta_k$ ), интервалы между калибровками постоянны на всём МПИ ( $\Delta t_{\text{МКИ}} = \text{const}$ ). Такая ситуация показана на рисунке 5.

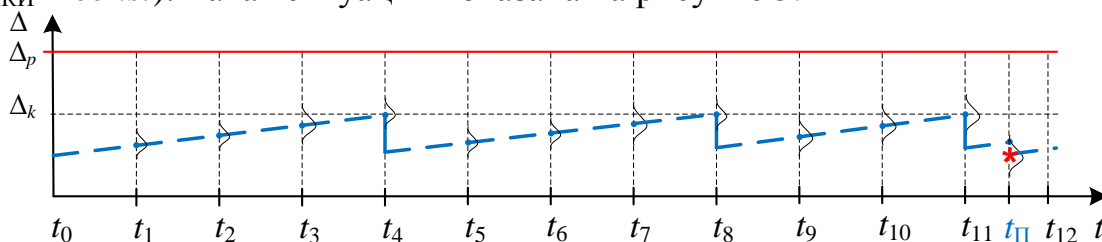


Рисунок 5 – Второй случай изменения погрешности СИ во времени

3) Скорость дрейфа возрастает и превышает допустимое значение ( $v > v_{\text{доп}}$ ), значения погрешности не превышают допусаемые пределы ( $\Delta_k \leq \Delta \leq \Delta_p$ ), интервалы между калибровками сокращаются ( $\Delta t_{\text{МКИ}} \downarrow$ ). Пример такой ситуации проиллюстрирован на рисунке 6.

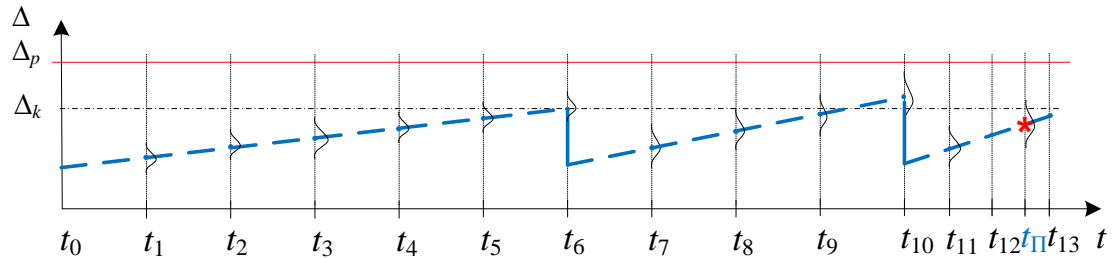


Рисунок 6 – Третий случай изменения погрешности СИ во времени

4) Погрешность изменяется со скоростью, превышающей допустимую ( $v > v_{\text{доп}}$ ), интервалы между калибровками сокращаются ( $\Delta t_{\text{МКИ}} \downarrow$ ), погрешность превышает допусаемое значение ( $\Delta \geq \Delta_p$ ). Пример такой ситуации представлен на рисунке 7.

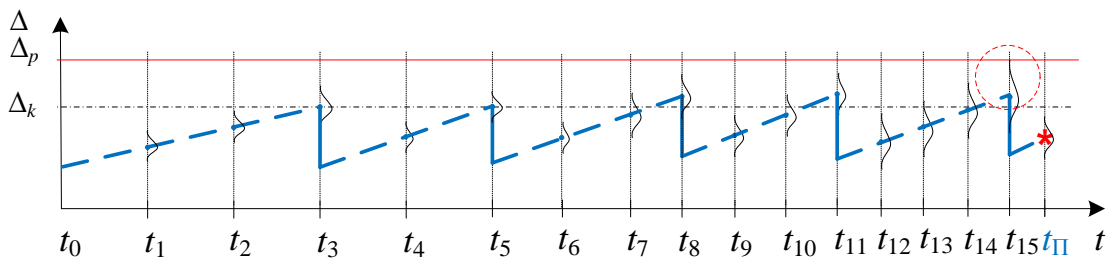


Рисунок 7 – Четвертый случай изменения погрешности СИ во времени

На рисунках 4-7 символами  $t_1, \dots, t_{15}$  обозначены моменты времени проведения калибровочных измерений, \* – значения погрешности СИ в момент проведения поверки  $t_{\text{п}}$ .

Контролировать метрологическую исправность СИ в процессе эксплуатации можно по значению суммарной погрешности в рабочих условиях. Погрешность можно представить в виде временного ряда значений, определенных по результатам проведения калибровочных измерений на межповерочном интервале. Рисунок 8 иллюстрирует зависимость изменения погрешности СИ во времени.

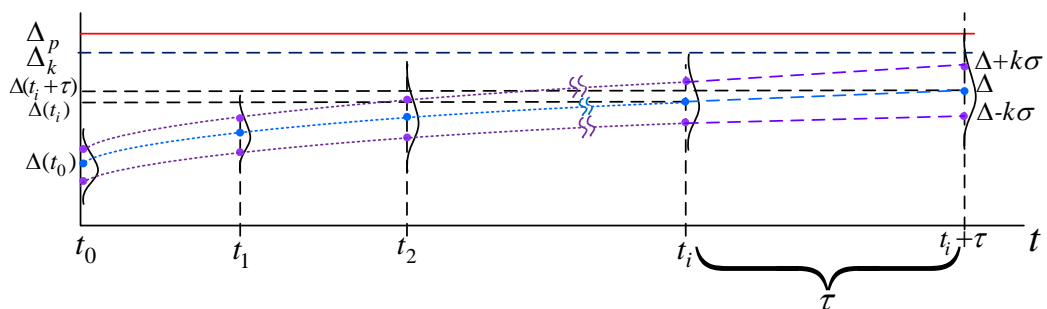


Рисунок 8 – Зависимость изменения погрешности СИ от времени

На стадии проектирования СИ для прогнозирования изменения погрешности формируется модель изменения погрешности во времени  $\Delta(t_i)$ ,

и задаются уровень погрешности  $\Delta_k$ , при достижении которого происходит коррекция характеристики преобразования, и допускаемые пределы погрешности  $\Delta_p$ , при которых СИ признается еще годным к применению. Также при проектировании СИ задается вероятность выхода СИ из класса точности  $P$  (вероятность выхода за пределы  $\Delta_p$ ), равная например, 5%. Для построения модели изменения погрешности используются результаты определения погрешности в  $K$  калибровочных точках в соответствующие моменты времени  $\{\Delta_K(t_i)\}_{i=0}^n$  ( $n$  – порядковый номер калибровки), накопленные в памяти СИ при проведении калибровок в процессе эксплуатации.

Определив методом экстраполяции, через какое время  $\tau$  прогнозируемое значение функции  $\Delta(t_i + \tau)$  достигнет значения  $\Delta_k$ , вычисляются прогнозные значения моментов проведения коррекции  $\tau_k$ , а при определении времени выхода погрешности за допускаемые пределы  $\Delta_p$  – определяется время наступления метрологического отказа. Таким образом, для прогнозирования метрологического отказа требуется следующий набор данных:

- значения погрешности  $\{\Delta_K(t_i)\}_{i=0}^n$  в калибровочных точках в соответствующие моменты времени проведения калибровочных измерений  $t_i$  (фиксируются в памяти СИ);

- значение погрешности  $\Delta_k$ , при достижении которой происходит коррекция характеристики преобразования (должно быть указано в сопроводительной документации на СИ);

- допускаемые пределы погрешности  $\Delta_p$ , при выходе за которые с заданной вероятностью  $P$  СИ признается непригодным к применению.

При разработке методики поверки в число поверяемых точек должно быть включено множество точек  $K_j \in \{K_1, K_2, \dots, K_j\}$ , в которых происходит калибровка в процессе эксплуатации СИ.

Включать значения погрешности, определенные при поверке, в набор данных для обработки совместно с результатами определения погрешности результатов измерений, полученных в процессе эксплуатации, следует в следующих случаях:

- 1) Коррекция характеристики преобразования в процессе эксплуатации не требуется и не осуществляется – погрешность не превышает допустимое значение:  $\{\Delta_K(t_i)\}_{i=0}^n < \Delta_k$  (случай 1 на рисунке 4). Значения погрешности, определенные при поверке, включаются в набор из результатов определения погрешности результатов измерений, полученных в процессе эксплуатации, для построения модели изменения погрешности.

- 2) Последняя коррекция характеристики преобразования в процессе эксплуатации осуществлена непосредственно перед проведением поверки:  $t_n \approx t_{\Pi}$  (случай 2 на рисунке 5). Включение результатов определения погрешности, полученных при поверке, проведенной практически сразу после коррекции, для построения модели изменения погрешности нецелесообразно, поскольку они не в полной мере отражают уровень реальной погрешности в процессе эксплуатации. В таком случае результат поверки используется для проверки значимости расхождения результатов

измерений в момент последней калибровки с результатами измерений, полученными в момент проведения поверки. Если сравниваемые выборки расходятся незначимо, то результаты, накопленные в процессе эксплуатации, можно использовать для прогнозирования изменения погрешности.

Если система метрологического самоконтроля свидетельствует об исправности СИ, а при очередной поверке установлено, что СИ непригодно к применению, одной из причин может быть неисправность первичного измерительного преобразователя (ПИП), не используемого при калибровочных измерениях (пример структурной схемы на рисунке 2). В таком случае следует провести техническое обслуживание, ремонт или замену ПИП. Другой возможной причиной установления при поверке непригодности СИ к применению может быть неисправности подсистемы коррекции. Если при поверке подтвердилась метрологическая исправность СИ, то информация о погрешности СИ, накопленная за МПИ, предоставляет возможность прогнозировать наступление метрологического отказа СИ на предстоящем периоде эксплуатации.

При прогнозировании времени наступления метрологического отказа могут быть даны следующие рекомендации по использованию СИ на предстоящем МПИ:

- СИ будет метрологически исправно (например, для первого и второго случаев изменения погрешности на рисунках 4 и 5 соответственно);
- на очередном МПИ с вероятностью  $P$  возможно наступление метрологического отказа – СИ следует отправить в ремонт (до достижения времени  $T$ ) (например, для третьего случая изменения погрешности на рисунке 6).

При превышении значений погрешности допускаемых пределов СИ признается непригодным к применению (четвертый случай изменения погрешности на рисунке 7).

Этапы обработки результатов калибровочных измерений и описанные рекомендации по использованию СИ на предстоящем МПИ можно представить в виде «дерева» ситуаций, изображенного на рисунке 9.



Рисунок 9 – Дерево ситуаций при обработке калибровочных измерений

Обработку результатов калибровочных измерений можно разделить на следующие этапы:

Этап 1 – Анализ скорости изменения погрешности: дрейф практически может отсутствовать ( $v \rightarrow 0$ ), скорость дрейфа может не превышать допустимое значение ( $v \leq v_{\text{доп}}$ ) или быть выше допустимой ( $v > v_{\text{доп}}$ ).

Этап 2 – Анализ величины МКИ: МКИ может оставаться постоянным ( $\Delta t_{\text{МКИ}} = \text{const}$ ) или сокращаться в процессе эксплуатации ( $\Delta t_{\text{МКИ}} \downarrow$ ).

Этап 3 – Прогнозирование метрологической исправности и выработка рекомендаций по использованию СИ на очередном МПИ.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования макета измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования, а также результаты применения разработанного алгоритма прогнозирования изменения погрешности СИ с функцией метрологического самоконтроля.

Для исследования СИ с функцией метрологического самоконтроля был создан макет измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования и регистрацией результатов калибровочных измерений.

Для определения закона распределения случайной составляющей погрешности измерения физической величины проведен ряд экспериментов. На рисунке 10 показано распределение плотности вероятностей случайной составляющей погрешности результатов измерений сопротивления.

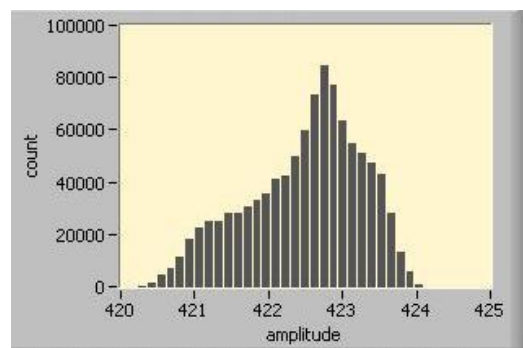
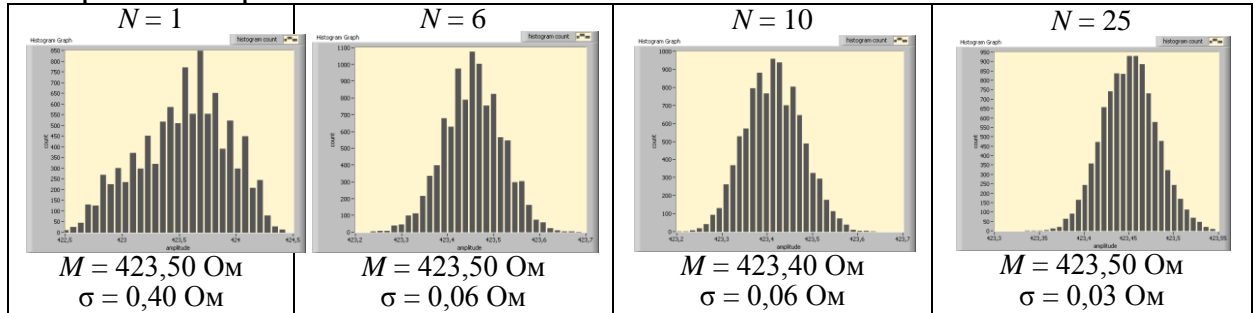


Рисунок 10 – Распределение плотности вероятностей случайной составляющей погрешности результатов измерений

Результаты экспериментов показали, что закон распределения случайной составляющей погрешности отличен от нормального.

Получать в многоканальных системах выборки измерений большого объема по каждому каналу нецелесообразно – снижается коэффициент готовности канала. Проведены исследования случайной составляющей погрешности измерений при малом количестве отсчетов  $N$  в каждой серии измерений. В таблице 1 представлены примеры распределений результатов измерений сопротивления ( $N = 1$ ) и распределения математических ожиданий результатов измерений сопротивления при различных значениях количества отсчетов  $N$  в каждой серии измерений: 6, 10 и 25.

Таблица 1 – Распределения математических ожиданий результатов измерений сопротивления



Результаты экспериментов показали, что значительное уменьшение случайной составляющей погрешности происходит уже при малой выборке объемом из 6 – 25 значений математических ожиданий.

Проведены эксперименты с макетом измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования: получены данные от подсистемы коррекции для четырех случаев изменения погрешности, рассмотренных в третьей главе. Также проведены эксперименты, соответствующие поверке измерительного канала.

На рисунках 11-14 представлены графики зависимости во времени приведенной погрешности измерений, построенные по результатам, накопленным в памяти СИ в процессе эксплуатации.

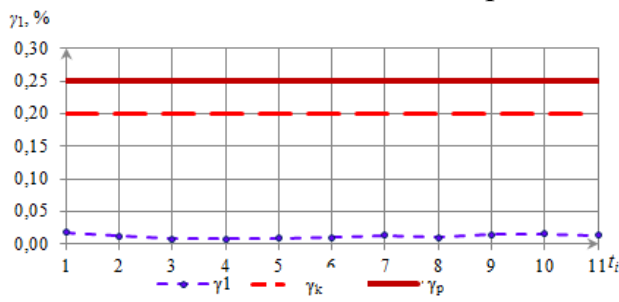


Рисунок 11 – Случай 1

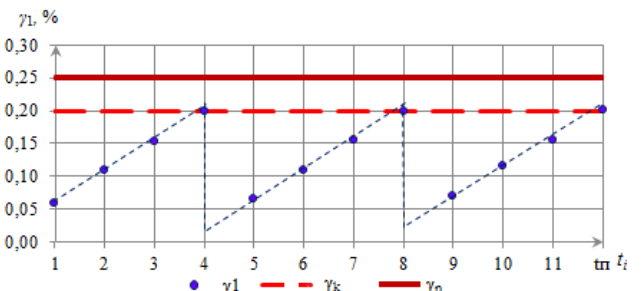


Рисунок 12 – Случай 2

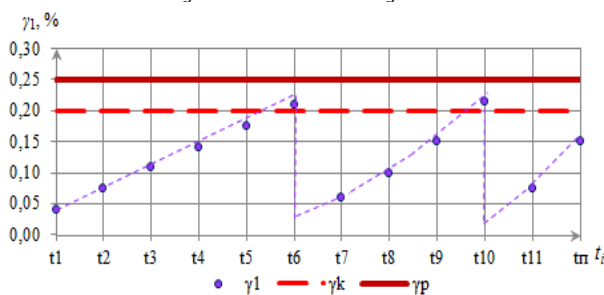


Рисунок 13 – Случай 3

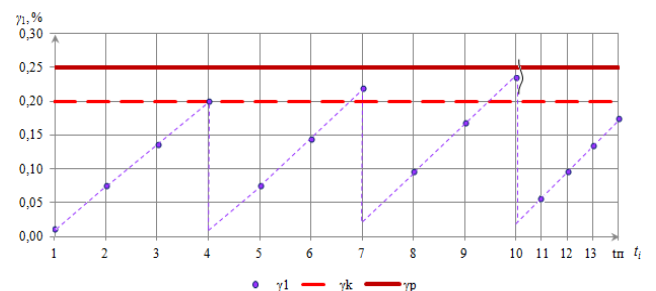


Рисунок 14 – Случай 4

Проведенные исследования показали результативность разработанного алгоритма прогнозирования изменения погрешности СИ с функцией метрологического самоконтроля за счет использования результатов работы подсистемы коррекции, которая заключается в следующем.

1) Если при обработке результатов калибровки устанавливается факт отсутствия коррекции характеристики преобразования в процессе эксплуатации по причине низкой скорости дрейфа и недостижения значений погрешности допустимых пределов, или если скорость изменения погрешности постоянна, межкалибровочный интервал остается неизменным



на всем МПИ, то алгоритм прогнозирования предоставляет возможность прогнозировать метрологическую исправность СИ на очередных МПИ.

2) Если скорость дрейфа погрешности в процессе эксплуатации возрастает, но не превышает допустимую, подсистема коррекции при этом исправна (МКИ сокращаются), то знание о вероятности наступления метрологического отказа на очередном МПИ предоставит возможность своевременно провести техническое обслуживание СИ и избежать использования СИ, непригодных к применению.

**В приложениях** представлены описания разработанного программного обеспечения: программного компонента, позволяющего проверить гипотезу значимости расхождения математических ожиданий двух выборок по критерию Манна-Уитни, и программного компонента для проверки значимости расхождения дисперсий по критерию Зигеля-Тьюки. Также в приложении представлена принципиальная электрическая схема измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Предложен алгоритм обработки выборок результатов измерений, позволяющий обоснованно корректировать характеристику преобразования в процессе эксплуатации, который в отличие от ранее разработанных алгоритмов обрабатывает выборки различного объема при недостаточности априорных знаний о законе распределения.

2. Для СИ с функцией метрологического самоконтроля разработан алгоритм получения данных при калибровках и поверках, предоставляющий возможность прогнозировать метрологический отказ СИ на очередном МПИ.

3. Разработан алгоритм прогнозирования изменения погрешности, позволяющий прогнозировать вероятность наступления метрологического отказа СИ на установленном интервале.

4. Разработанное алгоритмическое обеспечение средств измерений с функцией метрологического самоконтроля проверено на макете измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования. Применение разработанного алгоритмического обеспечения позволит гарантировать метрологическую исправность СИ на предстоящем МПИ с заданной вероятностью.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

#### **Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Утушкина, А.В. Эффективность процедур коррекции метрологических характеристик средств измерений / Е.О. Грубо, П.Г. Королев, А.В. Утушкина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 6. – С. 71-77.
2. Утушкина, А.В. Обеспечение метрологической исправности средств измерений / Е.О. Грубо, П.Г. Королев, Н.В. Романцова, А.В. Утушкина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2012. – № 8. – С. 100-106.

3. Утушкина, А.В. Алгоритм неполного перебора составления расписания работы измерительной системы / Е.О. Грубо, П.Г. Королев, Н.В. Романцова, А.В. Утушкина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2013. – № 2. – С. 66-71.
4. Крупская, А.В. Прогнозирование межповерочного интервала на основе анализа результатов поверки и работы подсистемы коррекции / П.Г. Королев, А.В. Крупская // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017. – № 2. – С. 80-85.
5. Крупская, А.В. Прогнозирование метрологического отказа средства измерений с функцией метрологического самоконтроля // Приборы. – 2017. – № 7 (205). – С. 36-43.

**Публикации в других научных изданиях и материалы конференций:**

1. Утушкина, А.В. Обеспечение длительного межповерочного интервала средств измерений для труднодоступных районов / А.В. Утушкина // Междунар. конгресс «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов», научно-практ. конф. «Геополитические факторы устойчивого развития Арктики и инновационные технологии прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций». Санкт-Петербург, 29 нояб. 2012 г. – СПб, 2012. – С. 151-154.
2. Утушкина, А.В. Алгоритм анализа деградации метрологических характеристик СИ / Е.О. Грубо, П.Г. Королев, А.В. Утушкина // 65-я научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ: Сборник докладов, Санкт-Петербург, 24 янв. – 4 фев. 2012 г. – СПб: изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 196-200.
3. Утушкина, А.В. Измерительные и управляющие системы с метрологическим автосопровождением / А.В. Утушкина // Проблемы автоматизации и управления в технических системах: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Пенза, 23-25 апр. 2013 г. / Пенз. гос. унив., – Пенза, 2013. – С. 62-65.
4. Утушкина, А.В. Увеличение межповерочного интервала средств измерений параметров энергоносителей / П.Г. Королев, А.В. Утушкина // Энергосбережение, информационные технологии и устойчивое развитие: Сб. докл. Междунар. научно-практ. интернет-конф. молодых ученых, Ижевск, 23-28 июня 2014 г. / ФГБОУ ВПО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», – Ижевск, 2014. – С. 177-184.
5. A.V. Utushkina, Yu.V. Filatov, P.G. Korolev, A.V. Tsareva, Measuring channel with automatic correction data conversion // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW), 2015 IEEE NW Russia. – P. 184-187.
6. A.V. Utushkina, P.G. Korolev, A.V. Tsareva, N.A. Kuzmina Research of the Measuring Channel with Automatic Correction Data Conversion // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW) 2016 IEEE NW Russia. – P. 451-454.
7. Утушкина, А.В. Методика определения интервала между сеансами синхронизации шкал времени с учетом ретроспективных данных / Л.Я. Белов, В.К. Кошелев, А.В. Утушкина // Метрология времени и пространства: Сб. докл. VIII Междунар. симпозиума, Санкт-Петербург, 14-16 сентября 2016 г. / ФГУП «ВНИИФТРИ», – Менделеево, 2016. – С. 156-158.