

*На правах рукописи*

Грубо Елена Олеговна

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОВЫШЕНИЯ  
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы  
(приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

**Научный руководитель**

кандидат технических наук, доцент  
Королев Павел Геннадьевич

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
Кондрашкова Галина Анатольевна  
кандидат технических наук  
Шевченко Сергей Юрьевич

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский институт  
электроизмерительных приборов ОАО «НИИ ЭЛЕКТРОМЕРА»

Защита состоится «7» декабря 2011 года в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5. в ауд.5108

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « 03 » ноября 2011 г.

Ученый секретарь совета  
к.т.н., доцент

Боронахин А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одним из основных показателей качества средств измерений (СИ) является метрологическая надежность (МН) – свойство СИ сохранять во времени метрологические характеристики (МХ) в пределах установленных норм. МН определяется характером и темпом изменения нормируемых МХ. Чем выше показатели МН (вероятность работы без метрологического отказа, метрологический ресурс, интенсивность отказов и т.д.), тем реже приходится поверять СИ, тем меньше риск использования неисправного прибора в течение межповерочного интервала (МПИ). Сведения о МН СИ необходимы для правильной организации его метрологического обслуживания, а также назначения сроков очередной поверки.

Задача, решаемая при определении МПИ, состоит в нахождении временных изменений метрологических характеристик и построении математической модели, экстраполирующей полученные результаты на заданный интервал времени. Для построения математической модели изменения МХ во времени необходимо использовать статистические данные, полученные в ходе испытаний на надежность либо данные, полученные в результате поверок. Однако, результаты испытаний на надежность, проводимые в лабораторных условиях не могут дать объективной информации о деградации измерительных каналов СИ в реальных условиях эксплуатации под воздействием внешних факторов. В существующей на данный момент нормативной документации, устанавливающей требования к межповерочным интервалам, рассматривается тип средства измерения, а не экземпляр, при этом, характер временных изменений МХ СИ может быть весьма разнообразным даже у однотипных СИ. Поэтому для повышения достоверности этих исследований, должны быть учтены индивидуальные особенности и условия эксплуатации экземпляра СИ. В силу указанных причин представляется целесообразным организовать работы по изучению метрологической надежности средств измерений непосредственно у потребителей. С целью повышения эффективности использования СИ необходимо оснастить прибор подсистемой контроля временных изменений МХ.

Реализация подсистемы контроля временных изменений МХ СИ под управлением микроконтроллера с функцией записи и обработки полученных данных позволит:

- контролировать метрологические характеристики СИ в течение всего срока службы с учетом влияния внешних факторов непосредственно на месте эксплуатации;
- строить математические модели изменения МХ во времени, оценивать скорость изменения МХ, а также прогнозировать время наступления метрологического отказа;
- планировать сроки ремонтных и профилактических работ.

В настоящее время появились новые технические возможности использования ранее разработанных подходов для повышения эффективности СИ, что связано с применением алгоритмов получения и обработки измерительной

информации в реальном масштабе времени с помощью микроконтроллеров и ЭВМ. Поэтому разработка вопросов связанных с повышением метрологической надежности СИ являются перспективными и актуальными.

**Целью** данной диссертационной работы являются разработка структурно-алгоритмических решений для построения и использования СИ, направленных на повышение эксплуатационной метрологической надежности за счет диагностики и прогнозирования состояния измерительного тракта на основе данных о текущем состоянии контролируемых параметров СИ.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие **задачи**:

- разработка структурных решений для построения СИ с прогнозируемым метрологическим ресурсом;
- разработка алгоритмического обеспечения СИ с коррекцией погрешностей и прогнозируемым метрологическим ресурсом;
- разработка алгоритмов обработки полученных данных с целью прогнозирования метрологического ресурса;
- проверка теоретических положений о влиянии структурно-алгоритмических решений на метрологический ресурс.

**Методы исследования** включают в себя методы математического анализа, теорию вероятностей и математической статистики, методы математического и имитационного моделирования, математической метрологии.

**Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработаны структурно-алгоритмические решения для СИ с подсистемой коррекции, позволяющие определять метрологический ресурс экземпляра средства измерения.
2. Разработаны алгоритмы работы подсистемы коррекции характеристики преобразования, позволяющие обеспечить нахождение СИ в пределах установленных допусков в течение максимально возможного периода времени.
3. Предложены методические рекомендации по выбору алгоритмов работы процессорного средства измерения с управляемым метрологическим ресурсом.

**Научная новизна** результатов работы:

1. Разработаны алгоритмы функционирования подсистемы коррекции погрешностей средств измерений на основе регистрации внутренних параметров.
2. Предложены методические рекомендации по метрологическому сопровождению СИ с подсистемой регистрации внутренних параметров.
3. Разработано алгоритмическое обеспечение для СИ с коррекцией повышающих метрологический ресурс за счет ограничения влияния факторов, снижающих эффективность коррекции.

**Практическая значимость научных результатов.**

Разработанные структурные и алгоритмические решения для средств измерений с встроенным регистратором внутренних параметров позволяют:

- увеличивать метрологический ресурс,

- осуществлять непрерывный контроль параметров метрологической надежности непосредственно на месте эксплуатации,
- планировать сроки ремонтных и профилактических работ, а также метрологического обслуживания.

Проведенный анализ трудоемкости калибровочных процедур показал, что при проведении однократных автокалибровочных измерений требуемый объем энергонезависимой памяти регистратора параметров СИ за год составит 166,4 кбайт, для многократных автокалибровочных измерений – 16 Мбайт.

Разработанные структурные и алгоритмические решения могут быть широко использованы при создании СИ, применяемых в жестких условиях эксплуатации с длительным отсутствием доступа, в производстве с непрерывным циклом, а также в системах коммерческого учета энергоресурсов.

**Реализация и внедрение результатов исследований.** Результаты исследований использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проводимых в СПбГЭТУ: НОЦ/ЛИНС-82 «Разработка методического и алгоритмического обеспечения безопасного и энергетически эффективного управления локомотивом» (госконтракт № 14.740.11.0404) и ПН/ИИСТ-27 «Создание интеллектуальной системы мониторинга и управления энергопотреблением с прогнозируемым метрологическим ресурсом в зданиях и сооружениях» (госконтракт № 16.516.11.6039).

**Апробация.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Научно-практической конференции «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» (Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 2006, 2007 гг.), конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (2006, 2008, 2009, 2010), на всероссийском конгрессе «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России» (СПб, 2008 г.), на Международном конгрессе «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России» (СПб 2009, 2010 гг.)

**Публикации.** Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 11 статьях и докладах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, 8 в научных сборниках и трудах российских и международных конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Содержание изложено на 135 страницах, включая 34 рисунка и 4 таблицы, а также 1 приложение.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы, определяется основное направление исследований, формулируются цели и задачи исследований, приводятся основные положения работы.

**В первой главе** проанализировано современное состояние метрологического обеспечения средств измерений, рассмотрены математические модели дрейфа метрологических характеристик, методы определения и контроля показателей метрологической надежности, критерии для определения МПИ.

Анализ современного состояния нормативной базы, устанавливающей требования к назначению межповерочных интервалов показал, что, при расчете вероятности метрологической исправности рассматривается тип средства измерений, а не экземпляра; не учитывается модель дрейфа метрологической характеристики, а также условия эксплуатации средства измерений; межповерочные интервалы устанавливаются фиксированными; отсутствует возможность определения состояния МХ в любой момент времени. В рамках существующей системы метрологического обеспечения средств измерений в результате поверки устанавливается факт метрологического отказа, в то время как для обеспечения единства измерений процедура поверки СИ должна его предупреждать.

В ГОСТ 8.565-99 предлагается назначение первичного МПИ с последующей его коррекцией в ходе эксплуатации на основе данных, полученных в результате поверочных работ. С помощью предложенного метода можно выявить лишь совершенно очевидные и грубые ошибки в назначении МПИ серийно выпускаемых СИ. Для единичных СИ и СИ, выпускаемых небольшими партиями, обладающих длительными межповерочными интервалами (4 – 6 лет) к моменту накопления данных достаточных для построения математической модели измерения МХ во времени, само средство измерения отслужит большую часть своего срока службы и успеет морально устареть. С другой стороны, межповерочные интервалы для аналитических средств измерений составляют от 3 месяцев до полугода, тогда как полный срок службы превосходит МПИ в десятки раз. Это указывает, во-первых, на нерациональное использование эталонов и, во-вторых, на необоснованность трудозатрат на поверочные работы.

Точность определения МПИ, прежде всего, обусловлена точностью исходных данных. При получении исходных данных для определения МПИ возможны следующие источники информации:

- испытания СИ или его отдельных блоков;
- данные о нестабильности элементов СИ;
- показатели метрологической надежности СИ, нормируемые или подтвержденные испытаниями;
- результаты поверок СИ.

Определение показателей метрологической надежности осуществляется экспериментальным, расчетно-экспериментальным, аналитическим методами, а также методами статистического моделирования на ЭВМ.

Контроль показателей надежности осуществляется экспериментальным методом, а также сбором сведений о надежности приборов непосредственно у потребителя. Экспериментальный метод контроля показателей надежности заключается в проведении контрольных испытаний. Подтверждение надежности путем организации сбора сведений о надежности приборов в условиях эксплуатации производится в тех случаях, когда по техническим или экономическим соображениям контрольные испытания нецелесообразны или невозможны, а также для получения более обширной информации об эксплуатационных свойствах приборов.

Путем сбора и обработки эксплуатационной статистики о надежности СИ решается ряд важных задач:

1. Определение фактической надежности СИ и установление расхождения показателей надежности, нормируемых в ТУ с реальной надежностью этих приборов.
2. Определение статистических характеристики метрологических отказов СИ в процессе эксплуатации. Эта информация необходима для уточнения параметров метрологического обслуживания, в частности назначения межповерочных и межкалибровочных интервалов.
3. Обратная связь с потребителем с целью определения узких в отношении надежности мест в приборах, разработки и реализации мероприятий по повышению качества и надежности СИ.

Значительные расходы, связанные с проведением контрольных испытаний на надежность и получением статистической информации от потребителей, вынуждают искать пути снижения затрат на эти работы. В связи с этим ставится задача теоретического и экспериментального изучения вопросов метрологического обеспечения СИ, как на этапе проектирования, так и в эксплуатационных условиях реального объекта. Решение данной задачи направлено на исследование условий, закономерностей и тенденций, связанных с обеспечением метрологической надежности СИ, характеризующей снижение качества СИ за счет его старения и износа и увеличения метрологических отказов. Таким образом, с увеличением требований к качеству функционирования СИ, возрастает необходимость метрологических исследований, оценивающих данное качество, т.е. ставится задача метрологического обеспечения, его выбора и обоснования, на всех этапах «жизни» СИ. Требования оперативности проведения метрологических испытаний, поверки и контроля (с целью получения необходимых статистических данных для построения модели дрейфа МХ СИ), повышения достоверности их результатов и уменьшения временных затрат приводит к необходимости создания встроенных систем метрологического контроля СИ.

**Во второй главе** на основании анализа способов увеличения метрологического ресурса измерительных каналов, а также моделей основной погрешности разработаны структурно-алгоритмические решения для оценивания метрологического ресурса на базе метода образцовых сигналов.

Одной из основных операций автоматической коррекции является измерение погрешности и выработка соответствующего корректирующего значения. Метод

образцовых сигналов позволяет оценить изменение во времени основной инструментальной погрешности СИ.

Под основной инструментальной погрешностью измерительного канала понимается приведенная к выходу погрешность  $\Delta_o$ , обусловленная отклонением реальной характеристики преобразования (РХП)  $y$  в нормальных условиях от номинальной характеристики преобразования (НХП)  $y_n$ :

$$\Delta_o(x) = y - y_n = \sum_{i=1}^n a_i x^{i-1} - \sum_{i=1}^m a_{in} x^{i-1} = \sum_{i=1}^n b_i x^{i-1} \quad (1)$$

где  $b_i = a_i - a_{in}$ ,  $a_i$  – коэффициенты полинома описывающего РХП,  $a_{in}$  – коэффициенты полинома описывающего НХП

Для осуществления идеальной коррекции величина поправки должна быть равна основной погрешности СИ в заданной точке диапазона измерения с обратным знаком:

$$z(x_j) = -\Delta_o(x_j)$$

Алгоритмы коррекции на базе образцовых сигналов делятся на две большие группы: методы коррекции на основе образцовых воздействий, формируемых с использованием измеряемой величины и методы коррекции без использования измеряемой величины. В первом случае корректируемый результат используется в качестве основы для формирования образцовых воздействий, при этом каждое основное измерение сопровождается процедурой коррекции. При реализации второй группы методов образцовые воздействия устанавливаются заранее в соответствии с диапазоном измерения входной измеряемой величины.

В зависимости от структурных, алгоритмических, схемотехнических и конструктивных решений построения основного измерительного канала СИ, а также условий применения и воздействующих дестабилизирующих факторов, разработаны различные структурно-алгоритмические решения формирования и введения корректирующего воздействия. Образцовый сигнал формируется на вход: первичного измерительного преобразователя – алгоритмы КП1, КП2, КП1(И), КП2(И), КП3(И); нормирующего преобразователя – КП1, КП2. В зависимости от ограничений, накладываемых на быстродействие, корректирующее воздействие вводится: после реализации процедуры аналого-цифрового преобразования, либо масштабирования, либо обратного преобразования.

На рисунке 1 представлена структурная схема алгоритма коррекции КП1: корректирующий сигнал формируется на входе первичного измерительного преобразователя. Здесь К – коммутатор, ПИП – первичный измерительный преобразователь, НП – нормирующий преобразователь, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, УОС – устройство образцовых сигналов

Реализация данного способа возможна для средств измерений, измеряющих величины, образцовые меры которых можно реализовать в рабочих условиях эксплуатации СИ.



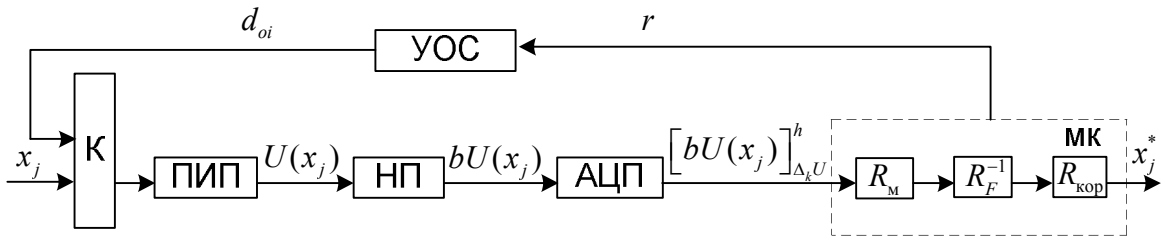


Рисунок 1. Алгоритм КП1

Алгоритм КП1 содержит следующие операции:

1. В режиме «Измерение» фиксируется значение  $x_j^*$ , соответствующее текущему значению измеряемой величины  $x_j(t)$

$$x_j^* = R_F^{-1} R_M R_{a-u} R_{nn} R_{nun} x_j(t), \quad (2)$$

где  $R_{nun}$  – оператор первичного преобразования измеряемой величины,  $R_{нп}$  – оператор масштабирования (нормализация),  $R_{a-u}$  – оператор аналого-цифрового преобразования,  $R_M$  – оператор масштабирования,  $R_F^{-1}$  – оператор, реализующий обратное функциональное (градуировочное) преобразование.

2. В режиме «Калибровка» на вход измерительного канала при помощи идентификатора команд  $r$  (задание образцовых сигналов) последовательно подаются образцовые сигналы  $d_{oi}$  от УОС. Номинальные значения образцовых сигналов определяются по НХП:

$$d_{ni} = y_n(d_{oi}).$$

3. Образцовые сигналы  $d_{oi}$  измеряются в соответствии с уравнением измерения (2):

$$d_{oi}^*(t) = R_F^{-1} R_M R_{a-u} R_{nn} R_{nun} d_{oi}(t).$$

4. Формируется массив погрешностей:

$$\{\Delta_{oi}\} = \{d_{oi}^*\} - \{d_{ni}\}, i = \overline{1 \dots k}$$

5. Определяются параметры корректирующей функции

$$z(x_j) = R_B \{b_i\},$$

где  $R_B$  – вспомогательный оператор вычисления коэффициентов уравнения (1).

6. Поскольку  $\Delta_0$  (и ее характеристики) изменяется в диапазоне измерения, значение поправки выбирается в зависимости от входной величины  $x_j$  (определяется по функции обратной НХП  $x_j = y_n^{-1}(x_j^*)$ ). Корректирующая функция:

$$R_{кор} = R_z z(x_j),$$

где  $R_{кор}$  – оператор введения коррекции погрешности,  $R_z$  – оператор выбора значения поправки.

7. Коррекция результата измерений с учетом поправки

$$x_j^* = R_{кор} x_j^*(t) \quad (3)$$

Состав полной погрешности, для случая введения корректирующего воздействия после процедуры аналого-цифрового преобразования, запишется в

соответствии со схемой вычисления полной погрешности, представленной на рисунке 2, где  $\Delta x_j^*$  - полная погрешность результата измерения,  $\Delta_k x_j^*$  - погрешность, возникающая в результате неидеальности процедуры коррекции,  $\Delta_m x_j^*$  и  $\Delta_f x_j^*$  - погрешности вычисления, возникающие из-за ограниченности разрядной сетки вычислительного устройства.

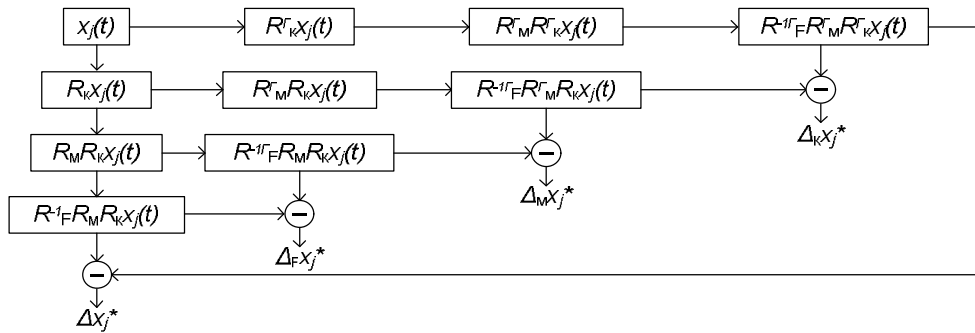


Рисунок 2. Схема вычисления полной погрешности.

Корректировочные процедуры применяются для удержания погрешности СИ в установленных пределах в течение длительных промежутков времени. Поэтому коррекция должна считаться эффективной, если основная погрешность СИ не выходит за установленные допустимые пределы в течение заданного времени.

Эффективность коррекции:

$$\Theta_k = \frac{\theta[\Delta x_j^*]}{\theta[\Delta_k x_j^*]}$$

где  $\theta[\Delta x_j^*]$  - значение характеристики погрешности в отсутствие коррекции результатов измерений;  $\theta[\Delta_k x_j^*]$  - значение характеристики погрешности после выполнении коррекции результатов измерений.

В случае представления полной погрешности в виде суммы систематической и случайной составляющих, то эффективность коррекции запишется следующим образом:

$$\Theta_k = \frac{\theta[\bar{\Delta}x_j^* + \Delta x_j^*]}{\theta[\bar{\Delta}_k x_j^* + \Delta_k x_j^*]}$$

Систематическая составляющая  $\bar{\Delta}x_j^*$  основной погрешности уменьшается в результате коррекции в разной степени, в зависимости от продолжительности времени затрачиваемого на осуществление самой коррекции, и от степени корреляции низкочастотных составляющих. Величина погрешности  $\Delta_k x_j^*$  в результате коррекции принципиально неустранима. Коррекция должна считаться неэффективной:

- если в результате выполнения калибровочных процедур и внесения поправки точность СИ не улучшается;
- в течение межкалибровочного интервала скорректированная погрешность СИ успевает приблизиться к допустимому значению либо превзойти его;

- Причиной неэффективности коррекции могут быть следующие факторы
- наличие (рост) случайной составляющей полной погрешности;
  - некорректно выбраны параметры серии многократных измерений для определения поправок (объем выборки, частота опроса);
  - метрологический отказ.

На рисунке 3 представлены кривые распределения плотностей вероятностей случайной составляющих погрешности в различные моменты времени осуществле-

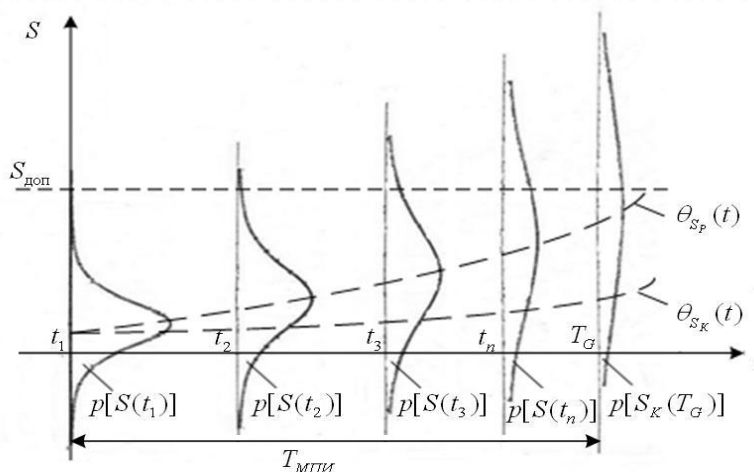


Рисунок 3. Модель дрейфа систематической и случайной составляющих основной погрешности

ния коррекции  $p[S(t_1)], p[S(t_2)], \dots, p[S(t_n)]$ ;  $\theta_{Sp}(t)$  - аналитическая зависимость функции изменения во времени вероятностной характеристики нескорректированной погрешности;  $\theta_{Sk}(t)$  - аналитическая зависимость функции изменения во времени вероятностной характеристики скорректированной погрешности полученной в результате введения поверки.

**В третьей главе** разработаны алгоритмы функционирования подсистемы встроенного метрологического контроля для случаев с преобладанием систематической или случайной составляющих полной погрешности. Алгоритмы позволяют оценивать скорость дрейфа систематической и случайной составляющих погрешности и устанавливать интервалы автокалибровки, а также изменять объем выборки при многократных измерениях в зависимости от величины дисперсии случайной составляющей. Исходя из рекомендаций ГОСТ 8.009-84, а также для ограничения влияния случайной составляющей на коррекцию в ходе выполнения автокалибровки осуществляется контроль соотношения  $\sigma[\Delta_o] / \Delta_{o,sp}$ , где  $\sigma[\Delta_o]$  - среднее квадратическое отклонение случайной составляющей

основной погрешности СИ;  $\Delta_{o,sp}$  - предел допускаемой систематической составляющей основной погрешности, а так же скорость дрейфа случайной составляющей погрешности.

Для более детального анализа причин роста случайной составляющей погрешности параллельно с автокалибровочными измерениями производятся вспомогательные измерения температуры и напряжения в «контрольных точках»

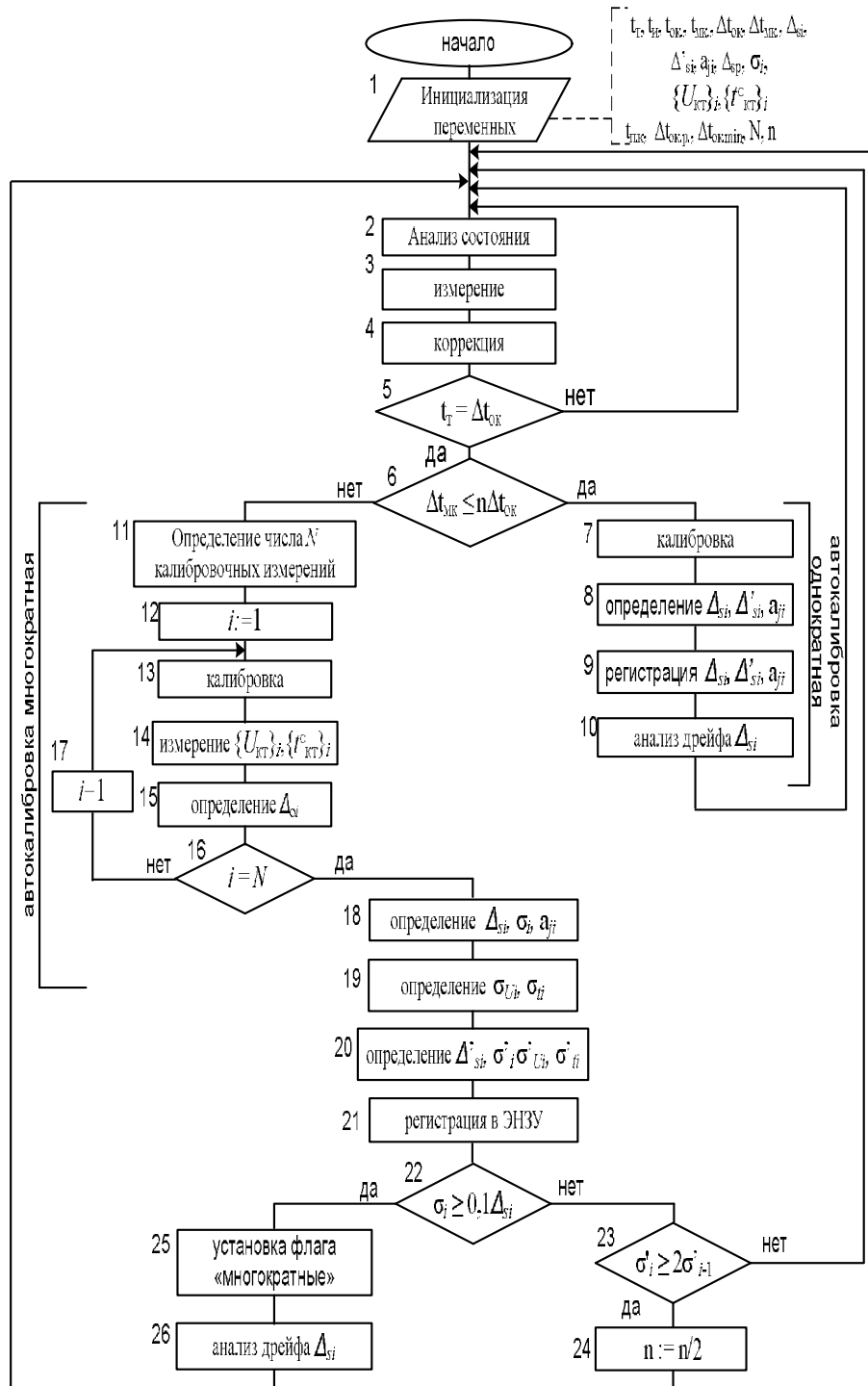


Рисунок 4 Алгоритм коррекции погрешности, с учетом дрейфа случайной составляющей погрешности ИК

схемы ИК. Коррекция считается эффективной, если величина основной погрешности СИ находится в допустимых пределах в течение интервала автокалибровки. В каждом алгоритме осуществляется проверка на наличие отказов. Измерения в дополнительном измерительном тракте производятся одновременно с автокалибровочными измерениями, полученные данные регистрируются в энергонезависимом запоминающем устройстве и далее анализируются в регистраторе параметров СИ. Такого рода избыточность, не оказывая существенного влияния на работу основного измерительного тракта, позволяет строить более гибкие алгоритмические решения, повышая тем самым эффективность коррекции и увеличивая метрологический ресурс.

На рисунке 4 представлен алгоритм коррекции погрешности, с учетом дрейфа случайной составляющей погрешности ИК. В качестве исходных данных задаются следующие параметры: текущее время  $t_T$ ; время, затрачиваемое на проведение однократных автокалибровочных измерений  $t_{OK}$ ; время, затрачиваемое на проведение многократных автокалибровочных измерений  $t_{MK}$ ; интервал времени между однократными автокалибровочными измерениями  $\Delta t_{OK}$ ; интервал времени между многократными автокалибровочными измерениями  $\Delta t_{MK}$ ; время измерения физической величины  $t_u$ ; допустимый предел систематической составляющей погрешности  $\Delta_{sp}$ .

Разработан алгоритм оценки метрологического ресурса на основе данных, полученных от подсистемы коррекции. Алгоритм оценки метрологического ресурса заключается в прогнозировании экстремальных значений погрешности по результатам определения ее частных значений в отдельных точках шкалы при известном виде полинома, описывающего временной дрейф погрешности.

Метрологическим ресурсом СИ будем называть время  $t_p$  в течение которого метрологическая характеристика  $S$  достигает допустимых границ наперед заданной области  $[D_{1доп}, D_{2доп}]$  с доверительной вероятностью  $P_d$ :

$$t_p = F\{p[S(t)], D_{доп}, P_d\}$$

Прогнозирование состояния МХ СИ осуществляется на основе:

- анализа данных об изменении МХ на интервале наблюдения  $T_1$  в дискретные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n \in T_1$ ;
- построение математической модели дрейфа, выражающей зависимость исследуемой МХ  $S(t)$  от времени  $t$ ;
- экстраполяция значений функции  $S(t)$  на область прогноза  $T_1$ :

$$S(t_i + \tau) = H[\{S(t_i)\}_{i=0}^n]$$

где  $H$  – оператор прогноза, который осуществляет экстраполяцию поведения  $S(t)$  из области  $T_1$  на область  $T_2$ .

Оценка адекватности определения метрологического ресурса сводится к проверке адекватности модели дрейфа МХ полученной на ее основе, по значениям,

полученным в результате проведения поверки в момент  $t_{п}$ . При этом отклонение определяется разностью:

$$\Delta(t_{п}) = S_{п}(t_{п}) - S_{м}(t_{п})$$

где  $S_{п}(t_{п})$  - значение МХ, полученное при проведении поверки,  $S_{м}(t_{п})$  - значение МХ, полученное по результатам прогнозирования.

**В четвертой главе** приведено описание машинного эксперимента по моделированию измерительных структур с коррекцией и оценкой метрологического ресурса. Предложены структурные решения подсистемы встроенного метрологического контроля, оценены временные соотношения в процессе автокалибровок, выполнен анализ трудоемкости автокалибровочных процедур, разработаны структуры данных встроенной системы метрологического контроля, описан эксперимент и оценены полученные результаты.

Реализация подсистемы встроенного метрологического контроля осуществляется на базе, введенной в состав СИ аппаратной и программно-алгоритмической избыточности, позволяющих осуществить мониторинг компонент прибора, влияющих на точность.

В состав функций подсистемы встроенного метрологического контроля временных изменений МХ входит:

- мониторинг компонент прибора, влияющих на точность;
- формирование образцовых сигналов по выбранному алгоритму;
- вычисление поправок;
- регистрация отклонений, характеризующих деградацию компонент ИК;
- введение поправок;
- выдача зарегистрированных параметров по запросу.

Под регистратором параметров средства измерений (РПСИ) понимается электронное вычислительное устройство с энергонезависимой памятью, объем которой достаточен для регистрации результатов работы подсистемы коррекции и вспомогательных измерений в течение заданного интервала времени. Функции вычислительного устройства РПСИ могут выполняться как процессором, включенным в измерительный канал, так и дополнительным процессором.

На рисунке 5 представлена структура СИ с многопроцессорной подсистемой встроенного метрологического контроля, где К1 и К2 – коммутаторы, ПИП – первичный измерительный преобразователь, НП<sub>ИК</sub> – нормирующий преобразователь, входящий в состав основного измерительного канала, НП<sub>*i*</sub> – *i*-й нормирующий преобразователь подсистемы вспомогательных измерений, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ВУ – вычислительное устройство, УОС – устройство образцовых сигналов, ИП – источник питания, ИКТ – измерительный канал температуры, РПСИ – регистратор параметров средства измерения,  $U_1 \dots U_n$  – напряжения в контрольных точках аналоговой части схемы. Здесь РПСИ – это самостоятельная измерительно-вычислительная подсистема, имеющая

энергонезависимое двухпортовое ОЗУ, запись в которую осуществляется под управлением ВУ\_2.

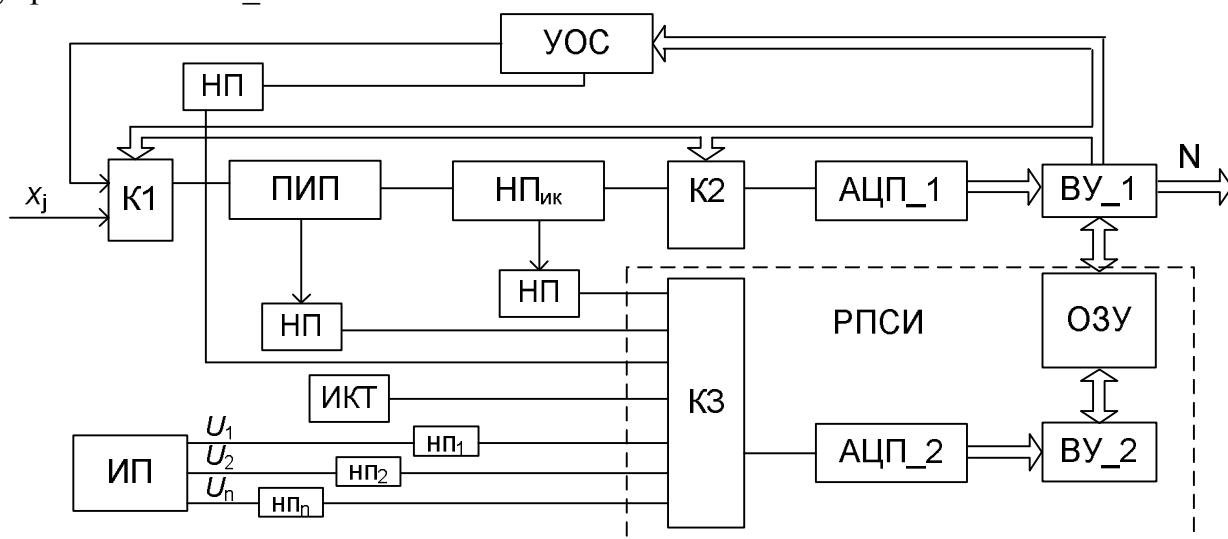


Рисунок 5 – Структура СИ с многопроцессорной подсистемой встроенного метрологического контроля

Анализ трудоемкости калибровочных процедур показал, что их вычислительная сложность описывается полиномом от размерности задачи  $T=O(pm)$ , где  $p$  – число на единицу большее порядка полинома, аппроксимирующего функцию коррекции,  $m$  – количество циклов опроса АЦП.

Разработаны структуры данных регистратора параметров средства измерения, предложен подход к оценке объема требуемой памяти.

Для проведения экспериментального исследования с целью подтверждения теоретических положений о влиянии структурно-алгоритмических решений на метрологический ресурс, было разработано программное средство, которое позволяет по ретроспективным данным, полученным от подсистемы встроенного метрологического контроля прогнозировать оставшийся метрологический ресурс.

Моделирование измерительного канала с автоматической коррекцией характеристики преобразования осуществляется на базе метода образцовых сигналов. Программное средство предоставляет следующие возможности:

- задание значения физической величины, подаваемой на вход модели измерительного канала;
- моделирование функции преобразования измерительного канала с учетом линейной и нелинейной деградации метрологических характеристик;
- выполнение многократных и однократных автокалибровочных измерений, в ходе которых определяются: скорости нарастания систематической и случайной составляющих погрешности, коэффициенты реальной характеристики преобразования;
- запись автокалибровочных измерений в табличной форме в виде файла Excel;
- коррекция систематической и случайной составляющих погрешности измерительного канала;

– прогнозирование систематической составляющей погрешности на заданный интервал времени.

На рисунке 6 представлен график результата коррекции в случае дрейфа систематической и случайной составляющих погрешности. Пунктирная линия – напряжение на выходе измерительного канала без коррекции, сплошная линия – с коррекцией, \* - моменты осуществления автокалибровочных измерений. При установлении дрейфа случайной погрешности частота выполнения многократных автокалибровок возрастает, что позволяет сохранять метрологическую характеристику СИ в пределах установленных допусков.

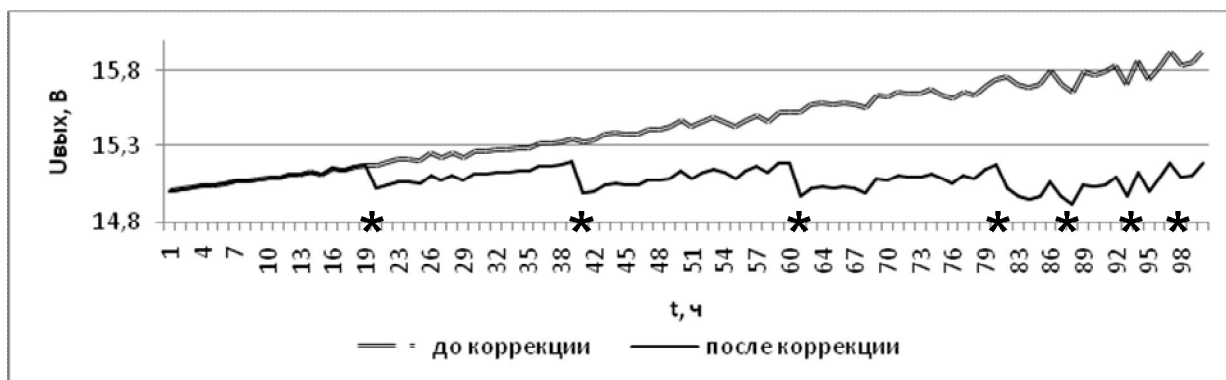


Рисунок 6 – зависимость результата измерения от времени при наличии коррекции погрешности

На рисунке 7 представлена зависимость погрешности от времени при наличии многократной коррекции.

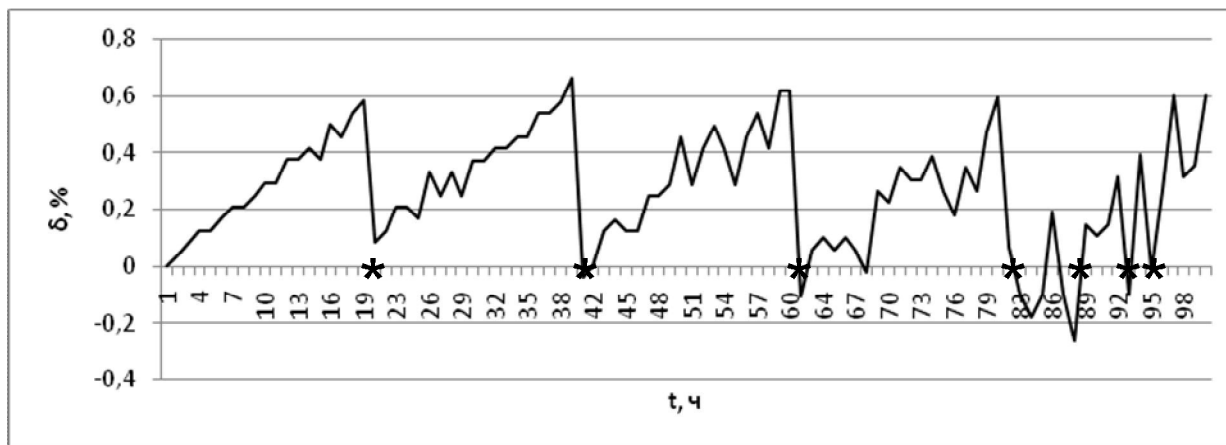


Рисунок 7 – зависимость погрешности от времени при наличии коррекции

В случае наличия дрейфа случайной составляющей погрешности использование однократных измерений при выполнении автокалибровочных процедур приводит к увеличению дисперсии погрешности вдвое. Многократные измерения в процессе автокалибровки позволяют повысить эффективность коррекции погрешности СИ и за счет этого продлить метрологический ресурс.



## **Заключение**

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны структурно-алгоритмические решения для СИ с подсистемой коррекции, позволяющие определять метрологический ресурс экземпляра средства измерения.
2. Разработаны алгоритмы работы подсистемы коррекции характеристики преобразования, позволяющие обеспечить нахождение СИ в пределах установленных допусков в течение максимально возможного периода времени.
3. Предложены методические рекомендации по выбору алгоритмов работы процессорного средства измерения с управляемым метрологическим ресурсом.
4. Проведен анализ погрешностей, возникающих в результате коррекции, предложены рекомендации по организации алгоритмического обеспечения процессорных СИ с коррекцией, позволяющие ограничить влияние методических погрешностей на результат измерения.
5. Разработаны структурно-алгоритмические решения, для различных способов ввода образцовых сигналов, в зависимости от вида физической величины, поступающей на вход ИК.
6. Проведен анализ трудоемкости калибровочных процедур и предложен подход к оценке требуемого объема энергонезависимой памяти РПСИ.
7. Разработано программное средство, которое позволяет по результатам моделирования СИ с системой встроенного метрологического контроля оценивать метрологический ресурс.

### **Список основных публикаций по теме диссертационной работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

#### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Грубо Е.О. К вопросу о проблеме определения межповерочных интервалов. / Грубо Е.О., Долидзе Р.В. Комаров Б.Г. // Известия Государственного электротехнического университета. Сер. «Приборостроение и информационно-измерительные системы», 2006. С 18-20.
2. Грубо Е.О. Принципы построения средств измерений с коррекцией составляющих полной погрешности/ Грубо Е.О., Алексеев В.В., Королев П.Г. // Приборы. №7. 2010. С. 57 – 63.
3. Грубо Е.О. Структуры и алгоритмы коррекции основной погрешности измерительного канала с использованием измеряемой величины / Грубо Е.О., Алексеев В.В., Королев П.Г. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. №4(19). 2010. - С. 23 – 32.

#### **Другие статьи и материалы конференций:**

4. Грубо Е.О. Метрологическая надежность автоматизированных информационно-измерительных систем учета энергоресурсов /. Грубо Е.О., Долидзе Р.В., Марченков Р.Ю. // Сборник трудов V Всероссийской НТК «Вузовская наука – региону» Вологда, 2007, т. 1.

5. Грубо Е.О. Метрологическое обеспечение систем мониторинга энергопотребления и экологического мониторинга / Королев П.Г., Грубо Е.О. // «Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий»: Труды конф. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2007, С. 57-62.
6. Грубо Е.О. Многоканальный регистратор для систем мониторинга экологических параметров технологического процесса / Грубо Е.О., Королев П.Г., Кузьмина Н.А., Романцова Н.В. // Труды всеросс. конгресса. «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России» - СПб, 14 – 15 ноября 2008.-С. 102-106.
7. Грубо Е.О. Особенности метрологического обеспечения средств измерений в тяжелых климатических условиях // Материалы международного конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов». Санкт-Петербург, 2009, С. 37 – 41.
8. Грубо Е.О. Повышение метрологической надежности средств измерений с автоматической коррекцией / Королев П.Г., Грубо Е.О., Тимиргалиев Р.А. // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. Муром, 5.02.2010 С. 179 – 181.
9. Грубо Е.О. Методика расчета метрологического ресурса измерительного канала для средств измерений с автоматической коррекцией / Грубо Е.О., Королев П.Г. // Сборник докладов 63-ей Научно-технической конференция профессорско-преподавательского состава университета. Санкт-Петербург, 2010 С. 228 – 233.
10. Грубо Е.О. Метрологическая надежность средств измерений, входящих в состав АИИС УЭ // Сборник докладов и инновационных предложений участников молодежной школы-семинара. Санкт-Петербург. 2010. С. 11 – 13.
11. Грубо Е.О. Трудоемкость калибровочных процедур средств измерений с увеличенным метрологическим ресурсом / Грубо Е.О., Королев П.Г., Мишур Э.М., Утушкина А.В.// Материалы международного конгресса «Цели развития тысячелетия и инновационные принципы устойчивого развития Арктических регионов». Санкт-Петербург, 2010, С. 110 – 115.