

Голь Станислав Артурович

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Специальность:

05.11.16 – “Информационно-измерительные и управляющие системы
(в технических системах)”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Goly', is positioned above a vertical red line.

Рязань 2006

Работа выполнена в Федеральном государственном учреждении высшего профессионального образования “Рязанский государственный радиотехнический университет”

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Виноградов Александр Леонидович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, академик Метрологической академии РФ
Страхов Алексей Федорович

кандидат технических наук, доцент
Бондарцев Владимир Васильевич

Ведущая организация: Открытое акционерное общество “Теплоприбор”,
г. Рязань

Защита состоится “ 20 ” декабря 2006 г. В 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан “ 18 ” ноября .

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1, диссертационный совет Д 212.211.04.

Ученый секретарь
диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Основными параметрами, требующими совершенствования в существующих измерительных преобразователях ИП являются точность измерения, диапазон измеряемой величины, диапазоны влияющих величин, надежность, срок службы, массогабаритные показатели.

Развитие конструкторско-технологических методов в нашей стране находится в неудовлетворительном состоянии. Многие передовые технологии, такие как гальваническое осаждение мембран, использование современных композитных материалов, менее чувствительных к влияющим величинам, микроминиатюризация и т.д. находятся в зачаточном состоянии или отсутствуют вовсе.

В частности, современные отечественные ИП давления, используемые в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами взрывобезопасных и взрывоопасных производств различных отраслей промышленности, таких как нефтегазодобывающая и нефтеперерабатывающая (начиная от сопровождения бурения скважин и заканчивая транспортировкой нефтепродуктов), химическая, металлургическая, машино- и приборостроение (авто- и авиаприборы, приборы над- и подводных судов) и т.д., часто имеют недостаточную погрешность преобразования, которая существенно зависит от воздействия неинформативных величин, в широких пределах, особенно от изменения температуры окружающей среды.

Анализ отечественных чувствительных элементов ЧЭ, основанных на использовании тензорезистивного эффекта в гетероэпитаксиальной пленке кремния, выращенной на поверхности монокристаллической пластины из искусственного сапфира, показал высокую нелинейность преобразования, чувствительность к влияющим факторам, а также большой разброс параметров от датчика к датчику по сравнению с аналогичными ЧЭ ведущих зарубежных производителей. Однако проведенные исследования выявили достаточную стабильность характеристик каждого отдельного ЧЭ для автоматической компенсации погрешностей развитыми методами, использующими структурно-алгоритмическую и временную избыточность.

Естественным следствием стремления учесть все большее число факторов, оказывающих влияние на процесс измерения, является усложнение методик градуировки и поверки ИП на этапе их производства. Для базирующейся на микропроцессоре коррекции погрешностей ИП необходимо ресурсоемкое определение параметров математической модели функции коррекции, осуществляемое на основе тестовых измерений при различных комбинациях образцовых значений измеряемой и влияющих величин. С развитием методов коррекции погрешностей, основанных на структурно-алгоритмической и временной избыточности, количество последних неуклонно растет. Сокращение производственных издержек на градуировку ИП без ущерба для их метрологических характеристик представляет важную проблему.

Существенным преимуществом микропроцессорных ИП является возможность практически полной автоматической градуировки, юстировки и поверки, т.е. наиболее дорогостоящих и долговременных операций, завершающих производственный цикл ИП. Являясь показателем его качества, эти операции должны осуществляться предельно ответственно, что осложняется влиянием субъективных факторов производственного персонала. В связи с этим проблема автоматизации становится особенно важной в условиях постоянно растущих объемов выпуска.

Перечисленные обстоятельства подтверждают актуальность задач, решаемых в диссертационной работе, определяют цель и основные направления исследований.

Цель диссертационной работы. Повышение точности и сокращение времени идентификации корректирующей функции прецизионных адаптивных измерительных преобразователей давления с использованием автоматизированной системы градуировки.

Задачи исследований.

1. Разработка и исследование метода адаптивной идентификации параметров корректирующей функции для компенсации погрешностей ИП.
2. Разработка способа сокращения количества измерительных экспериментов для идентификации корректирующей функции ИП на основе аппарата искусственных нейронных сетей ИНС.
3. Минимизация времени установления температурного режима градуируемых ИП.
4. Разработка аппаратно-программных средств автоматизированной системы градуировки ИП.
5. Испытание и исследование автоматизированной системы градуировки и ИП с целью подтверждения правильности предложенных решений.

Методы исследований базируются на структурно-алгоритмических методах коррекции погрешностей измерительных преобразователей, на теории дифференциальных уравнений и их разностных аналогов, на математическом аппарате искусственных нейронных сетей, на теории погрешностей, на теории автоматического управления, на численных методах оптимизации.

Научная новизна.

1. Способ коррекции погрешностей ИП с использованием следящей самонастройки параметров корректирующей функции в его обратной связи.
2. Комбинированная астатическая структура ИП, реализующая принцип инвариантности на основе многопараметрической функции коррекции.
3. Метод адаптивной идентификации корректирующей функции ИП на основе самонастройки ее параметров.
4. Способ сокращения измерительных экспериментов для идентификации корректирующей функции ИП на основе аппарата ИНС.
5. Алгоритм оптимального управления температурным режимом градуируемых ИП, минимизирующий время установления заданной температуры.

Практическая значимость и внедрение результатов работы.

Результаты диссертационной работы используются в серийном производстве комплекса унифицированных микропроцессорных ИП давления “Сапфир-22МР” (РИОУ.406233.049 ТУ).

Внедрение автоматизированной системы градуировки “АСГ-01” на ОАО “Теплоприбор” г. Рязань позволило:

- повысить конкурентоспособность продукции предприятия;
- достичь современного уровня метрологических характеристик измерительных преобразователей: основная погрешность преобразования – 0,1%, дополнительная – не превышает основной в рабочем диапазоне температур от –40°C до +80°C;
- сократить время их градуировки, юстировки и поверки в среднем на 25%;
- обеспечить возможность выпуска до 50-ти преобразователей давления в месяц на каждой системе “АСГ-01”,

что подтверждается актом внедрения.

В настоящее время микропроцессорные ИП “Сапфир-22МР” успешно эксплуатируются на предприятиях топливно-энергетического комплекса, химической и металлургической

промышленности: Игумновской ТЭЦ г. Дзержинск, ОАО “Невинномысской ГРЭС”, ОАО “Святогор” г. Красноуральск, ОАО “Воронежсинтезкаучук” и др.

Достоверность и обоснованность научных положений, результатов, выводов и рекомендаций, приведенных в диссертационной работе, обеспечиваются корректным использованием математического аппарата, имитационным моделированием на персональном компьютере, натурными экспериментальными исследованиями, достаточной апробацией материалов диссертации.

Положения, выносимые на защиту.

1. Способ компенсации погрешностей измерительных преобразователей давления, синтезированный на основе многомерной корректирующей функции, метода отрицательной обратной связи, интегрирования сигнала некомпенсации и метода вспомогательных измерений.

2. Метод адаптивной идентификации корректирующей функции измерительного преобразователя на основе самонастройки ее параметров.

3. Сокращение времени градуировки ИП за счет использования алгоритма оптимального управления температурным режимом градуируемых ИП, минимизирующего время установления заданной температуры, а также за счет сокращения числа градуировочных экспериментов для идентификации корректирующей функции на основе аппарата ИНС.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на

- V международной НТК “Современные средства управления бытовой техникой” (Москва, 2003),
- всероссийской НТК “Измерение, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях” (Бийск, 2005),
- всероссийской конференции “Качественная теория дифференциальных уравнений и ее приложения” (Рязань, 2006),
- всероссийской НТК “Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы” (Рязань, 2002, 2004),
- межотраслевого научно-техническом семинаре (Дзержинск, 2006).

По итогам открытого конкурса на лучшую научную работу студентов по естественным, техническим и гуманитарным наукам в вузах РФ (раздел 22 “Новые информационные технологии”) автор был награжден дипломом Минобразования России за работу “Программное обеспечение автоматизированной системы градуировки микропроцессорных датчиков давления”, в которой были отражены первые результаты исследований по теме диссертации.

Публикации по теме диссертации. Опубликовано 12 печатных работ, среди них 7 статей (2 из которых в журнале центральной печати, включенном в перечень ВАК).

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 88 наименований и пяти разделов приложений. Основной раздел изложен на 154 страницах машинописного текста, который поясняется 50 рисунками и одной таблицей. Общий объем диссертации, включая приложения, составляет 162 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности темы работы, формулируются цели и задачи исследований, раскрыты научная новизна и практическая значимость, приведены результаты реализации описанных технических решений, представляются основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию современного состояния техники измерения давления. Проведен анализ существующих схмотехнических решений, реализующих современные методы компенсации погрешностей ИП на основе структурно-алгоритмической и временной избыточности. Устранить их недостатки и использовать их преимущества позволил синтезированный в диссертационной работе способ компенсации погрешностей. Синтез этого способа показан на рисунке 1.

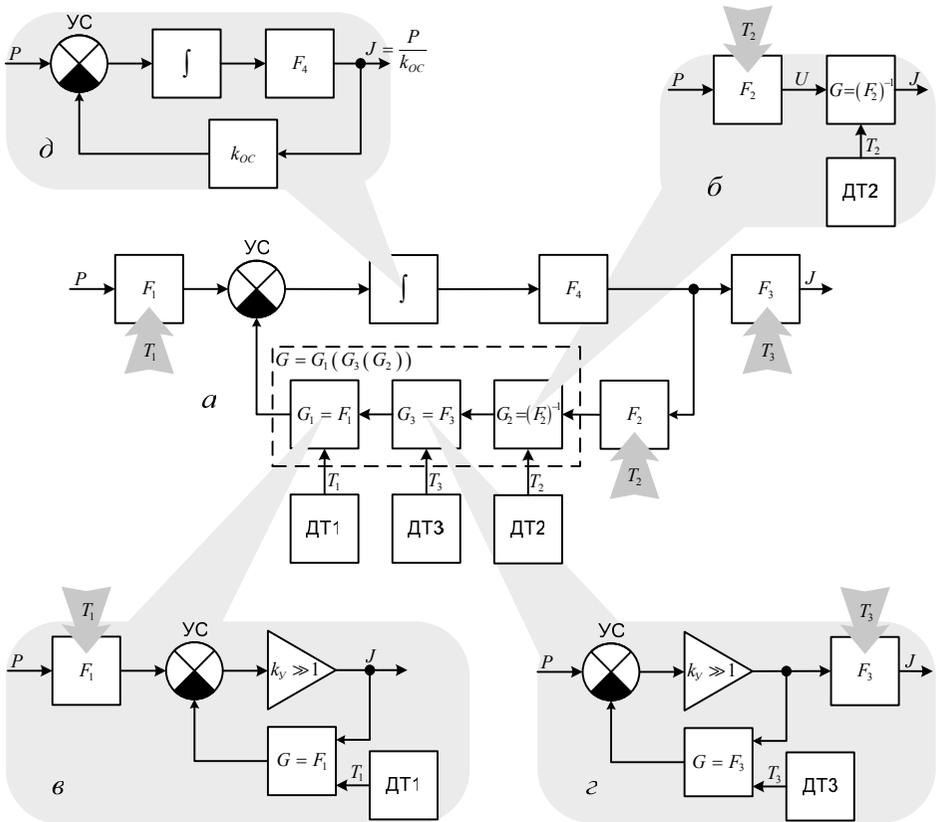


Рисунок 1 – Синтез способа коррекции погрешностей ИП:
 а) обобщенная структурная схема способа коррекции погрешностей ИП,
 б) метод линеаризации ИП на основе образцового обратного преобразования,
 в, г) варианты метода линеаризации ИП на основе образцового прямого преобразования,
 д) компенсационный преобразователь с полным уравновешиванием.

На рисунке 1–6 представлена структурная схема метода линеаризации ИП на основе образцового обратного преобразования. Для коррекции нелинейности преобразователя включают последовательно дополнительный нелинейный преобразователь (структурная избыточность) с функцией, обратной функции преобразования основного преобразователя. Если функция преобразования корректирующего преобразователя является в точности обратной к F_2 , т.е. $G = F_2^{-1}$, то его выходная величина J будет линейной функцией входной величины P . Корректирующую функцию $G = F_2^{-1}$ определяют на основе результатов градуировочных экспериментов, заключающихся в том, что измеряют значения выходной величины ИП U при различных комбинациях его входной величины P . Полученные координаты (P_j, U_j) , где $j = 1, 2, \dots, M$, симметрично отображают относительно номинальной функции преобразования $F_H = k_{инт} \cdot P$, где $k_{инт}$ – коэффициент преобразования скорректированного ИП. По полученным данным восстанавливают тем или иным способом аппроксимации корректирующую функцию G .

Если существует принципиальная возможность организации второго измерительного канала для влияющей величины ДТ2, то погрешность от ее воздействия на ИП устраняют методом вспомогательных измерений. Для осуществления принципа инвариантности к влияющей величине T_2 в корректирующем преобразователе реализуют функцию двух переменных – $G(U, T_2)$, которая компенсирует не только погрешность нелинейности ИП от входной величины, но и погрешность от негативного воздействия влияющей величины. В этом случае описанные градуировочные эксперименты проводят для нескольких образцовых значений влияющей величины. Полученные координаты (T_{2i}, P_j, U_{ij}) , где $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, M$, симметрично отображают относительно плоскости $F_H = k_{инт} \cdot P$ в координатах (T_2, P, U) . По отображенным данным восстанавливают корректирующую функцию $G(U, T_2)$.

Линеаризацию и инвариантность ИП к влияющей величине можно реализовать на основе образцового прямого преобразования. Для этого используется метод отрицательной обратной связи (рисунок 1–в). К выходу основного преобразователя F_1 подключается т.н. компенсационный преобразователь, состоящий из устройства сравнения УС, усилителя с коэффициентом усиления k_v и обратного преобразователя G . Условие линеаризации такого ИП

$$G = F_1(P) - \frac{k_{инт}}{k_v} \cdot P. \quad (1)$$

Задаваясь значением $k_{инт}$ так, чтобы $k_{инт} \cdot P < F_1(P)$ и применяя усилитель с большим коэффициентом усиления ($k_v \gg 1$), получим, что величиной $k_{инт} \cdot P / k_v$ в (1) можно пренебречь по сравнению с $F_1(P)$ и тогда $G(J) \approx F_1(P)$, т.е. для линеаризации всей цепи преобразования нужно, чтобы функция преобразования цепи обратной связи имела такой же вид, как функция основного нелинейного преобразователя.

Если есть принципиальная возможность организации второго измерительного канала для влияющей величины ДТ1, то, как и в предыдущем случае, можно обеспечить инвариантность ИП к влияющей величине T_1 .

На рисунке 1–г приведена структурная схема модификации описанного метода образцового прямого преобразования, отличающаяся тем, что компенсационный преобразователь подключается перед корректируемым ИП.

Из формулы (1) видно, что с увеличением k_v уменьшается погрешность приближения корректирующей функции G к F_1 . Бесконечного коэффициента усиления в прямой цепи компенсационного преобразователя в статическом режиме можно добиться, заменив усилитель k_v на интегратор, т.е. перейти к астатической системе первого порядка (рисунок 1–д). В отличие от предыдущей схемы это уже система не однократного действия, которая восстанавливает реальную статическую функцию преобразования (РСФП) до номинальной характеристики, а следящая система, которая сообщает РСФП определенное конечное приращение, функционально связанное с предварительно вычисленным значением погрешности ИП, с целью сведения последней к нулю.

На рисунке 1–а представлена структурная схема синтезированного способа, использующего комбинированную астатическую структуру ИП, включающую инвариантный канал компенсации по информативной величине и канал обратной связи по выходной переменной. Предложенная структура позволяет реализовать коррекцию погрешностей ИП с использованием следящей самонастройки параметров многопараметрической функции коррекции в обратной связи.

Способ позволяет также уменьшить случайную составляющую погрешности за счет ее усреднения в результате интегрирования сигнала некомпенсации.

Во второй главе исследованы потенциальные возможности синтезированного в первой главе способа компенсации погрешностей на примере реализующих его структур микропроцессорных ИП. Установлено, что идентификация функции коррекции G не может быть осуществлена алгоритмическим способом, т.е. по результатам градуировочных экспериментов вход-выход. Поэтому дальнейшие исследования посвящены выбору способа аппроксимации G ; разработке метода адаптивной идентификации на основе самонастройки ее параметров; определению достаточной для обеспечения проектного класса точности ИП и практически реализуемой погрешности, с которой математическая модель описывает корректирующую функцию.

На рисунке 2 представлена структурная схема адаптивной идентификации параметров математической модели корректирующей функции ИП “Сапфир-22МР”, структурная схема которого выделена серым фоном.

Первичный измерительный преобразователь ПИП (металлическая мембрана со связанным с ней ЧЭ – тензомостом ТМ Уитстона) расположен в измерительном блоке ИБ преобразователя. Все остальные элементы структурной схемы относятся к электронному блоку ЭБ. Деформация мембраны под воздействием приложенного к ней давления P преобразуется в измерительный сигнал – напряжение U , снимаемое с измерительной диагонали моста. Дополнительный параметр T , пропорциональный температуре ИБ, снимается с диагонали питания моста. Оба параметра переводятся аналого-цифровым преобразователем АЦП1 в цифровую форму $[U]$ и $[T]$ соответственно (здесь и далее $[]$ обозначает эквивалентный цифровой код величины, стоящей в квадратных скобках). Из $[U]$ в устройстве сравнения УС1 вычитается сигнал, полученный на выходе цифрового функционального преобразователя ЦФП, реализующего математическую модель корректирующей функции G . Полученная разность интегрируется цифровым интегратором ЦИ1 и последовательно переводится в выходную величину ИП – ток J с помощью ЦАП и преобразователя напряжение-ток ПНТ. В обратной связи ток J последовательно преобразователем ток-напряжение ПТН и АЦП2 преобразуется в эквивалентный цифровой код, который вместе с

$[T]$ используется для вычисления значения корректирующей функции G . В качестве математической модели функции коррекции сделан обоснованный выбор среди прочих способов в пользу кусочно-линейной аппроксимации КЛА.

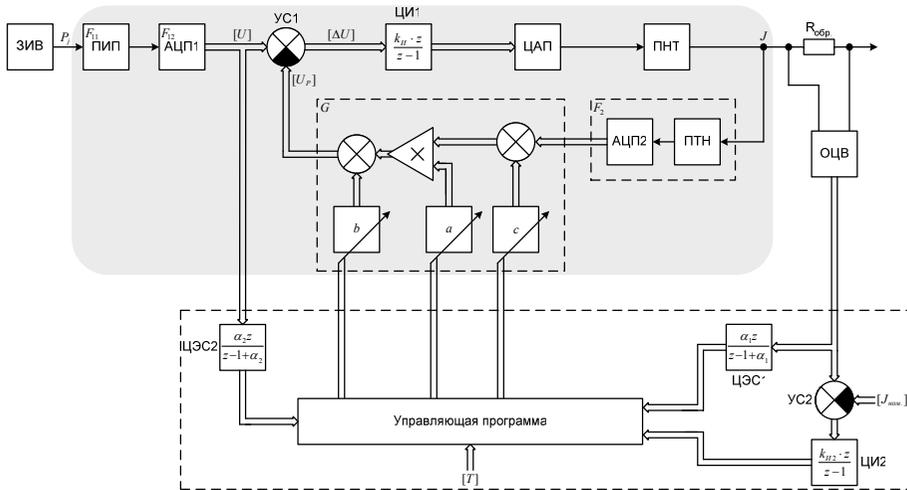


Рисунок 2 – Идентификация параметров КЛА трехмерной функции коррекции $G([T],[P])$.

Градуировка ИП происходит для ряда образцовых значений измеряемой величины – давления P и ряда образцовых значений влияющей величины – температуры T . Для этого ИП помещают в камеру холода и тепла КХТ, где его температуру доводят до первого значения из ряда градуировочных температур (T_1, T_2, \dots, T_N) . И после выхода на термоустойчивый режим приступают к адаптивной идентификации параметров в данном случае трехмерной математической модели корректирующей функции $G([T],[P])$.

Входной сигнал УС1 устанавливают равным нулю $[U]=0$, измеряют образцовым цифровым вольтметром ОЦВ текущее значение выходной величины ИП $[J]=[J]_0$, вычитают из него значение, соответствующее нижнему пределу этой величины $[J_{ном.}]_0=[J_{ном.}]_0$, интегрируют ЦИ2 полученную разность $[\Delta J]_0=[J]_0-[J_{ном.}]_0$ и используют значение на выходе ЦИ2 в установившемся режиме в качестве смещения цифро-аналогового преобразователя ЦАП c . При нулевом значении измеряемой величины $P=P_0=0$ значение аддитивного коэффициента первого сегмента КЛА b_1 равно значению цифрового кода на выходе АЦП1. Далее на вход ИП с задатчика измеряемой величины ЗИВ подают первое известное значение давления $P=P_1$, измеряют ОЦВ текущее значение выходной величины ИП $[J]=[J]_1$, вычитают из него значение, вычисленное по номинальной характеристике $[J_{ном.}]_1=k_{ИП} \cdot P_1$, интегрируют ЦИ2 полученную разность $[\Delta J]_1=[J]_1-[J_{ном.}]_1$ и используют значение на выходе ЦИ2 в качестве мультипликативного коэффициента первого сегмента КЛА a_1 . Коэффициент считается настроенным по завершении переходного процесса. Помимо коэффициентов первого сегмента также фиксируется значение ординаты его узловой

точки $[U]_j$ при значении измеряемой величины на входе ИП $P = P_1$. Далее на вход ИП подают следующее j -ое известное значение давления $P = P_j$, измеряют текущее значение выходной величины $[J] = [J]_j$ ОЦВ, сравнивают его со значением, вычисленным по номинальной характеристике $[J_{ном.}]_j = k_{ИП} \cdot P_j$, интегрируют полученную разность $[\Delta J]_j = [J]_j - [J_{ном.}]_j$ и используют значение на выходе ЦИ2 в качестве мультипликативного коэффициента a_j , а текущий аддитивный коэффициент вычисляют по формуле

$$b_j = [U]_{j-1} + \frac{a_j}{a_{j-1}}(b_{j-1} - [U]_{j-1}), \quad (2)$$

где $j = 2, \dots, M$. По завершении переходного процесса на выходе ЦИ2 мультипликативный и аддитивный коэффициенты j -го сегмента считаются настроенными. Кроме того фиксируется значение ординаты узловой точки j -ого сегмента $[U]_j$ при значении измеряемой величины на входе ИП $P = P_j$. После настройки коэффициентов всех M сегментов КЛА на температуре T_1 в КХТ устанавливается следующее значение из ряда градуировочных температур и градуировка продолжается по приведенной методике. Как только весь ряд градуировочных температур исчерпан, градуировка ИП считается завершённой.

ИБ ИП непосредственно контактирует с объектом измерения – жидкостью или газом в трубе или резервуаре, поэтому его температура может существенно отличаться от температуры ЭБ, который изолирован от объекта измерения. Для компенсации погрешностей измерения, вызванных двумя различными в общем случае влияющими температурами необходима 4-х мерная корректирующая функция $G([P], [T_{TM}], [T_{МК}])$. При этом температура ИБ $[T_{TM}]$ измеряется как и в предыдущем случае, а температура ЭБ $[T_{МК}]$ измеряется датчиком температуры ДТ, встроенным в микроконтроллер МК.

Оценка такой корректирующей функции, строится на основе двух КЛА: первая относится к ИБ, вторая – к ЭБ. В этом случае градуировка представляет собой поочередную настройку параметров соответствующих сегментов обоих КЛА для каждого образцового значения, воспроизводимого ЗИВ при определенных значениях температуры, устанавливаемых внутри КХТ. Структурная схема адаптивной идентификации параметров КЛА для случая четырехмерной функции коррекции $G([T_{TM}], [T_{МК}], [P])$ представлена на рисунке 3.

ИП, как и в предыдущем случае, выделен серым фоном, который разделен на две области, соответствующие разным, в общем случае, измеряемым температурам T_{TM} и $T_{МК}$. Настройка каждого отдельного параметра принципиально ничем не отличается от того, как это было описано выше. При этом КЛА ЭБ рассматривается как часть корректирующей функции, которая исключает систематические погрешности (включая температурную составляющую) преобразования входного напряжения АЦП в выходной ток с коэффициентом передачи $k_{ЭБ}$. В качестве образцовых значений напряжений используются значения напряжения на выходе ПИП, предварительно измеренные ОЦВ2. КЛА ИБ в свою очередь исключает систематические погрешности (также включая температурную составляющую) преобразования давления в выходное напряжение ПИП, а также задает ИП требуемый коэффициент передачи $k_{ИП}$.

Цифровые экспоненциальные сглаживания ЦЭС1 и ЦЭС2 (рисунки 2 и 3) снижают случайную составляющую погрешности идентификации параметров за счет ее усреднения. Решение о завершении настройки текущего параметра принимается при стабилизации сигнала с выхода УС2, когда его мгновенное значение не выходит за установленные границы в

течение определенного интервала времени. Этот критерий позволяет отследить случайные выбросы, вызванные, например, электромагнитными помехами или вибрациями, имеющими место в условиях промышленного производства. Это выгодно отличает разработанный метод по сравнению с процедурами градуировки, при которых параметры математической модели не самонастраиваются, а вычисляются по непосредственным результатам вход-выход измерительных экспериментов.

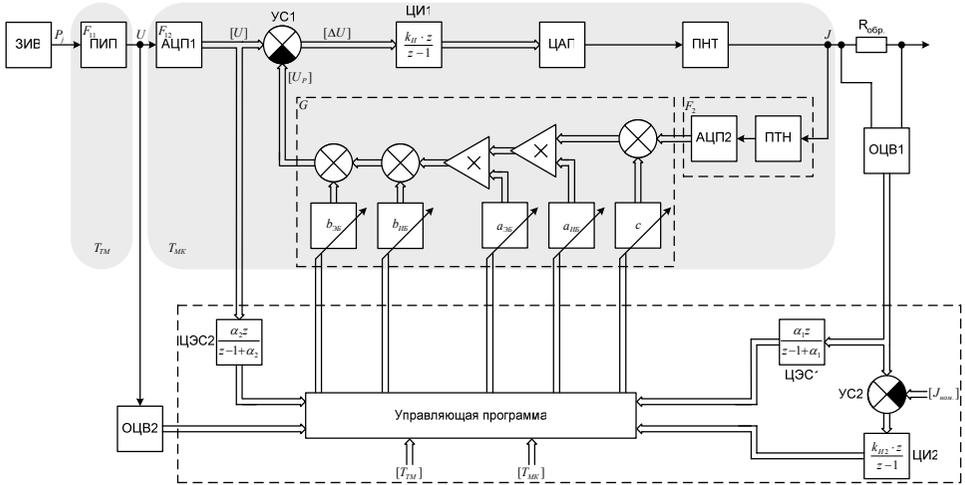


Рисунок 3 – Идентификация параметров КЛА трехмерной функции коррекции $G([T_{TM}], [T_{MK}], [P])$.

Коэффициенты КЛА при температурах, не являющихся узловыми, определяются микроконтроллером ИП исходя из пропорции

$$x_{[T],j} = \frac{x_{i,j} \cdot ([T]_{i+1} - [T]) - x_{(i+1),j} \cdot ([T]_i - [T])}{[T]_{i+1} - [T]_i}, \quad (3)$$

где $[T]_{i+1} > [T] > [T]_i$, $x_{i,j}$, $x_{(i+1),j}$ – экспериментально настроенные аддитивный или мультипликативный коэффициенты j -го сегмента на i -ой и $(i+1)$ -ой температурах.

Глава 2 завершается исследованием устойчивости разработанного метода адаптивной идентификации. Без потери общности оно осуществляется при рассмотрении упрощенной схемы (рисунок 4) самонастройки мультипликативного коэффициента $a(t)$ КЛА, описываемой системой нелинейных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dJ}{dt} = k_1 (U(t) - a(t) \cdot J(t)), \\ \frac{da}{dt} = k_2 (J(t) - k_3 \cdot U(t)), \end{cases} \quad (4)$$

где $U(t) \equiv const \neq 0$ – образцовая входная величина (ее значение остается постоянным), $J(t)$ – выходная величина ИП, $k_1, k_2 > 0$ – коэффициенты интегрирования, $k_3 > 0$ – номинальный коэффициент преобразования ИП.

Исключение из системы (4) переменной J приводит ее к уравнению Абеля второго рода, решение которого не выражается в квадратурах. Поэтому дальнейшее исследование системы (4) осуществляется методом первого приближения.

Система (4) имеет единственную стационарную точку $J = k_3 \cdot const, a = 1/k_3$.

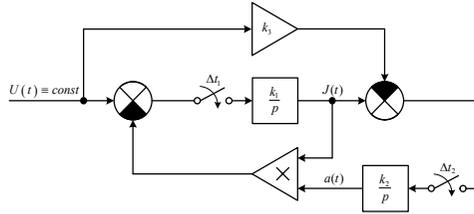


Рисунок 4 – Схема для исследования устойчивости.

Замена $J(t) = k_3 \cdot const + \Delta J(t)$, $a(t) = 1/k_3 + \Delta a(t)$ после линеаризации приводит к виду

$$\begin{cases} \frac{d\Delta J}{dt} = -\frac{k_1}{k_3} \Delta J(t) - k_1 \cdot k_3 \cdot const \cdot \Delta a(t), \\ \frac{d\Delta a}{dt} = k_2 \cdot \Delta J(t). \end{cases} \quad (5)$$

Решение линеаризованной системы (5) в зависимости от значения дискриминанта ее характеристического уравнения $D = (k_1/k_3)^2 - 4 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot const$ и значения $const$ распадается на четыре случая, фазовые портреты которых представлены на рисунке 5.

Далее от линеаризованной непрерывной схемы исследования, описываемой системой дифференциальных уравнений (5), осуществляется переход к цифровой линейной схеме с передаточной функцией (6), полученной для интервала дискретности $\Delta t_2 = M \cdot \Delta t_1$

$$\begin{aligned} H(z) = & k_1 \left(\left(e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} - e^{\frac{(M+1) \cdot k_1}{k_3}} \right) z^2 + \left(e^{\frac{(M+1) \cdot k_1}{k_3}} - 2e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} + e^{\frac{k_1}{k_3}} \right) z + \left(e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} - e^{\frac{k_1}{k_3}} \right) \right) // \\ & // \left(\left(e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} + const \cdot e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \right) \left(1 - e^{\frac{k_1}{k_3}} \right) \right) z^2 + \\ & + \left(const \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \left(e^{\frac{k_1}{k_3}} - e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} \right) + e^{\frac{(M+1) \cdot k_1}{k_3}} - e^{\frac{M \cdot k_1}{k_3}} + e^{\frac{k_1}{k_3}} - 1 \right) z + \left(1 - e^{\frac{k_1}{k_3}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Для обеспечения ее устойчивости в дополнение к ограничению на входной сигнал $const > 0$, полученному при исследовании системы (5), из параметрического неравенства (7) определяются ограничения на k_1, k_2, k_3 , а также на отношение интервалов дискретности $\Delta t_2/\Delta t_1 = M \in \mathbb{N}$.

$$|z_{1,2}(k_1, k_2, k_3, const, M)| < 1, \quad (7)$$

где $z_{1,2}$ – полюсы передаточной функции (6).

Третья глава посвящена решению проблемы сокращения времени градуировки микропроцессорных ИП, для которых, как правило, требуется ресурсоемкое определение параметров математической модели функции коррекции. В начале главы проводится анализ

различных оптимальных процедур градуировки, использующих решения, позволяющие сократить производственные издержки без ущерба для метрологических характеристик ИП. Отмечается общее для них положение, заключающееся в том, что сокращение информации при градуировочных экспериментах с каждым отдельным ИП компенсируется за счет использования определенным образом обобщенных характеристик типа градуируемого прибора (полученных, например, усреднением по репрезентативной выборке ИП). Это положение послужило отправной точкой для разработки способа сокращения градуировочных экспериментов на основе аппарата ИНС.

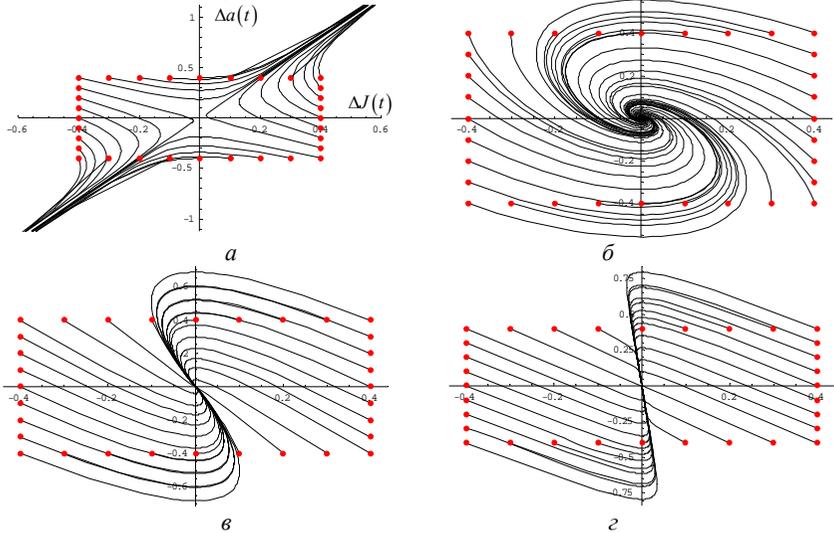


Рисунок 5 – Фазовые портреты решения линеаризованной системы:

- а) $const < 0$ – седло; б) $const, D < 0$ – устойчивый фокус; в) $const, D > 0$ – устойчивый узел; г) $const > 0, D = 0$ – устойчивый вырожденный узел.

ИП, произведенные в едином технологическом цикле, обладают некоторой общей зависимостью, представляющей собой сложное отображение параметров производственного цикла в характеристики ИП

$$\Psi \{ \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_L \} \rightarrow G(P, T), \quad (8)$$

где Ψ – нелинейный оператор; $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_L$ – параметры технологического цикла; $G(P, T)$ – функция коррекции, выраженная совершенным способом. Эта зависимость обладает свойством проявляться от прибора к прибору в РСФП. Идентификация этого отображения осложнена такими факторами, как недостаточность знаний о числе L и аналитическом описании параметров Θ_i . Поэтому его выявление должно осуществляться исключительно на базе наблюдений и представляет собой т.н. неформализуемую задачу поиска нелинейного оператора (8) преобразования входного пространства состояний в выходное.

Корректирующую функцию ИП можно представить в виде суммы

$$G(T, P) = b_G + k_G \cdot P + \Delta G(T, P), \quad (9)$$

где b_G – усредненное по температуре T постоянное смещение при отсутствии давления P на входе ИП, k_G – усредненный по температуре T коэффициент линейной зависимости

корректирующей функции от давления, $\Delta G(T, P)$ – остаточная нелинейная зависимость корректирующей функции от T и P .

Перед ИНС ставится задача по грубым оценкам $\Delta \hat{G}(T_N, P_j)$ для выбранного значения температуры T_N , вычисленным по степенному полиному, восстановленному на основе результатов градуировочных экспериментов для ряда образцовых значений давления P_j , $j = 1, 2, \dots, M$ на каждой из $(N - 1)$ образцовых значений температуры T , получить точные оценки значений корректирующей функции $\tilde{G}(T_N, P_j)$ без осуществления измерительных экспериментов при этом значении температуры. Предполагается, что оценки смещения \tilde{b}_G и коэффициента линейной зависимости \tilde{k}_G , полученные по результатам градуировочных экспериментов при $(N - 1)$ образцовых значениях температуры, существенно не изменятся с учетом градуировочных данных, полученных для N -го значения этой влияющей величины.

Из генеральной совокупности всех возможных $\Delta G(T, P)$ для данного типа ИП делается выборка путем градуировки Q ИП. По полученной для каждого ИП этой выборки матрице оценок узловых точек КЛА функции коррекции формируется обучающая пара вход-цель. Вектор цели вычисляется на основе элементов строки этой матрицы, содержащей результаты градуировочных экспериментов при выбранной температуре. По остальным данным этой матрицы вычисляются грубые оценки элементов означенной строки, которые объединяются во входной вектор обучающей пары. Далее сформированное таким образом обучающее множество предлагается ИНС в качестве учителя. ИНС обучается по грубым оценкам корректирующей функции $\Delta \hat{G}(T, P)$ вычислять точные оценки $\Delta \tilde{G}(T, P)$, которые в сумме с \tilde{b}_G и \tilde{k}_G по формуле (9) дают оценки узловых точек КЛА для выбранного из ряда образцовых значений температуры. Полученные таким способом узловые точки КЛА достаточны для обеспечения проектного класса точности ИП.

Предложенные решения на основе нейросетевой технологии подтвердили свою эффективность при градуировке ИП “Сапфир-22МР”. При этом использовалась трехслойная ИНС прямой передачи сигнала. Первый слой состоит из пяти нейронов со смещением, второй – из девяти нейронов со смещением, третий состоит из пяти нейронов со смещением. Функция активации нейронов первого и второго слоев – гиперболический тангенс, третьего – линейная. Обучение было проведено методом обратного распространения ошибки с использованием алгоритма Левенберга-Марквардта поиска глобального минимума функционала качества на основе обучающего множества объемом $Q = 238$ пар вход-цель.

Далее в третьей главе описывается алгоритм оптимального управления температурным режимом градулируемой партии ИП, позволяющий сократить время переходного процесса по сравнению со стандартным управлением КХТ, заключающемся в выводе температуры воздуха внутри полезного объема камеры на заданный уровень и поддержание ее в релейном режиме.

Суть оптимального управления КХТ состоит, например при нагревании, в определении момента времени t_{II} отключения нагревателя и включения компрессора КХТ, который минимизировал бы продолжительность выхода партии ИП на термоустановившийся режим. Таким образом, имеет место перерегулирование теплообменных процессов. Для рассмотрения выделены следующие объекты, участвующие в теплообмене: воздух внутри КХТ, поверхности ИБ и ЭБ, непосредственно контактирующие с воздухом внутри КХТ, располо-

женный в ЭБ МК со встроенным датчиком температуры, размещенный в ИБ чувствительный элемент – металлическая мембрана со связанным с ней ТМ Уитстона (напряжение, пропорциональное температуре ЧЭ снимается с диагонали питания моста), нагреватель или компрессор в зависимости от выбранного режима работы КХТ, а также окружающая среда. Теплообмен с последней происходит из-за неидеальности термоизоляции полезного объема КХТ. Температура поверхностей ИБ и ЭБ измеряется датчиками температуры ДТ, которые размещаются на одном из ИП градуируемой партии как показано на рисунке 6.

Теплообмен между выделенными объектами описывается системой дифференциальных уравнений. Определены вектор управления и вектор состояния, а также установлены соответствующие ограничения на них. Оптимальное время переключения $t_{Попт.}$ определяется по минимуму функционала качества, который представляет собой зависимость времени завершения последнего переходного процесса среди выделенных для рассмотрения объектов от времени переключения $t_{П}$. Минимум функционала ищется итерационно методом золотого сечения.

В четвертой главе описываются разработанные аппаратно-программные средства автоматизированной системы градуировки, юстировки и поверки ИП “АСГ-01” унифицированного комплекса микропроцессорных ИП “Сапфир-22МР” абсолютного давления, избыточного давления, разрежения, давления-разрежения, разности давлений и гидростатического давления. В этой системе нашли отражение все предложенные автором в рамках диссертационной работы решения. К нестандартному оборудованию этой системы относится блок оптимального управления температурным режимом и блок измерительный коммутационный. Последний предназначен для подключения определенного ИП из установленных в КХТ для цифровой коммуникации с персональным компьютером по интерфейсу RS-485 и переключения этого ИП с соответствующего технологического нагрузочного сопротивления R на образцовое $R_{обр.}$.



Рисунок 6 – КХТ с загруженной в нее партией ИП и точки измерения температуры на ИП “Сапфир-22МР”.

“АСГ-01” представляет собой распределенную многопроцессорную систему, управление которой осуществляет персональный компьютер с установленным специализирован-

ным программным обеспечением “ПРОКОНТ-Сапфир”, выполняющим следующие основные функции.

1. Обеспечение устойчивого процесса адаптивной идентификации параметров функции коррекции ИП.
2. Графическая визуализация изменения параметров, характеризующих состояние функционирования подсистем в реальном времени.
3. Сигнализация предупредительных и аварийных отклонений параметров.
4. Документирование всех действий, производимых над партией ИП как автоматически, так и по требованию оператора.
5. Считывание и запись карт памяти, содержащих значения параметров корректирующих функций, в энергонезависимую память ИП, а также их просмотр и редактирование.
6. Генерирование отчетов по проведенной градуировке, юстировке или поверке на основе результатов соответствующих запросов к базе данных.

Среди вспомогательных функций следует отметить следующие.

1. Формирование обучающего множества и обучение ИНС с целью получения с помощью нее оценок значений функции коррекции для ряда градуировочных значений давления P_0, P_1, \dots, P_M при определенном значении температуры T .
2. Вычисление различных статистик по выборкам параметров функций коррекции множества партий ИП, прошедших градуировку, и их графическая визуализация. Эти оценки используются для интегрального анализа всех этапов производства ИП, который основывается на том, что изменения в технологическом цикле (например, в связи с модернизацией или, наоборот, с деградацией оборудования) проявляются в отклонениях от устоявшихся средних значений статистик, вычисленных с учетом данных ИП, отградуированных после упомянутых изменений.
3. Автоматический режим регулирования коэффициентов ЦИ и ЦЭС на основе алгоритма стохастической аппроксимации, позволяющий ускорить настройку параметров функции коррекции по сравнению с определением параметров, при котором все постоянные времени неизменны.
4. Параллельно с МК выбранного ИП осуществление всех вычислительных операций по коррекции погрешностей и детальная их визуализация для выяснения причин отклонений от нормы при функционировании прибора, имеющих место, например, при рекламациях.
5. Режим тренировки, при котором программа имитирует функционирование аппаратных средств автоматизированной системы при градуировке партии ИП. Используется для обучения обслуживающего персонала.

В заключении приводится обобщение основных результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан и исследован способ на основе комбинированной астатической структуры ИП, включающей инвариантный канал компенсации по неинформативной величине и канал обратной связи по выходной переменной. Предложенная структура позволяет реализовать коррекцию погрешности ИП с использованием следящей самонастройки параметров многопараметрической функции коррекции в обратной связи. Показано снижение погрешностей при использовании структурной и временной избыточности.

2. Обоснован выбор кусочно-линейной аппроксимации в качестве базовой математической модели корректирующей функции ИП, определены основные назначения функции коррекции: компенсация систематических погрешностей, связанных с нелинейностью РСФП и влияющими факторами, а также определение общего коэффициента передачи ИП.

3. Предложены помехоустойчивые методы адаптивной идентификации математических моделей трех- и четырехмерных корректирующих функций на основе алгоритма самонастройки.

4. Исследована устойчивость процессов идентификации математической модели корректирующей функции. Определены параметры, оказывающие влияние на устойчивость, даны рекомендации по выбору их значений.

5. Исследованы оптимальные процедуры градуировки на основе различных планов измерительных экспериментов. Сделан вывод о том, что сокращение градуировочных экспериментов компенсируется за счет использования определенным образом обобщенных характеристик типа градуируемого прибора.

6. Разработан метод сокращения градуировочных экспериментов на основе аппарата ИНС. Показана эффективность метода на примере ИП “Сапфир-22МР”, заключающаяся в возможности исключения градуировки ИП при одном из, в среднем, пяти образцовых значений влияющей величины.

7. Разработан алгоритм оптимального управления температурным режимом ИП при градуировке, позволивший минимизировать время их вывода в КХТ на термоустановившийся режим. Экспериментальные исследования подтвердили сокращение трехчасового переходного процесса при стандартном управлении КХТ ее штатным блоком регулятора-измерителя температуры не менее чем на 40 мин. Определена зависимость уменьшения времени переходного процесса и соответствующего увеличения энергозатрат от значения заданной температуры.

8. Разработан аппаратно-программный комплекс автоматизированной системы градуировки ИП “АСГ-01”, реализующий все предложенные автором технические решения. “АСГ-01” используется в серийном производстве адаптивных микропроцессорных ИП “Сапфир-22МР” на ОАО “Теплоприбор”, г. Рязань, что подтверждается актом внедрения.

9. При использовании трехмерной корректирующей функции, погрешность измерительного преобразования составила 0,1 % от основного диапазона, дополнительная погрешность не превышает 0,07 % при изменении температуры на каждые 10 °С. Испытания ИП с четырехмерной корректирующей функцией подтвердили, что дополнительная составляющая погрешности от изменения температуры окружающей среды не превышает основной погрешности во всем диапазоне этой влияющей величины. Причем, несмотря на увеличение вдвое настраиваемых параметров, продолжительность градуировки возрастает лишь на 20–25 %.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Борисов А.Г., Виноградов А.Л., Голь С.А., Устинов К.С. Проектирование коммутатора-ретранслятора автоматизированной системы калибровки интеллектуальных датчиков давления. //Тезисы докладов всероссийской НТК студентов, молодых ученых и специалистов ”Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы”, Рязань: РГРТА, 2004. – С. 67–68.

2. Виноградов А.Л., Виноградов Ю.Л., Голь С.А., Таран Ю.А., Устинов К.С. Автоматизация кусочно-линейной аппроксимации статической функции преобразования интеллектуального датчика. //Новые информационные технологии. Межвузовский сборник. Рязань: РГРТА, 2003. – С. 50–54.

3. Виноградов А.Л., Виноградов Ю.Л., Голь С.А., Устинов К.С. Автоматизированная система идентификации статической функции преобразования интеллектуального датчика. //Новые информационные технологии. Межвузовский сборник. Рязань: РГРТА, 2003. – С. 48–50.

4. Виноградов А.Л., Виноградов Ю.Л., Голь С.А., Устинов К.С. Автоматизация кусочно-линейной аппроксимации статической функции преобразования интеллектуального датчика с применением нечеткой логики. //Информационно-измерительная и биомедицинская техника, Рязань: РГРТА, 2004. – С. 41–50.
5. Виноградов А.Л., Виноградов Ю.Л., Голь С.А., Устинов К.С. Прогнозирующая информационная система для автоматизированной градуировки интеллектуальных преобразователей давления. //Информационно-измерительная и биомедицинская техника. Сборник научных трудов. Рязань: РГРТА, 2005. – С. 83–88.
6. Виноградов А.Л., Голь С.А., Лавров А.М., Устинов К.С. Исследование устойчивости процесса настройки параметров функции коррекции измерительного преобразователя. //”Известия Российской академии естественных наук. Дифференциальные уравнения”, № 11, 2006. – С. 54–56.
7. Виноградов А.Л., Голь С.А., Румянцев С.В., Устинов К.С. Перспективы развития комплекса интеллектуальных приборов для измерения давления и расхода. //Перспективные проекты и технологии, №1, 2006. Рязань: Издательство “РИНФО”. – С. 64–69.
8. Виноградов А.Л., Голь С.А., Устинов К.С. Оптимальная процедура градуировки интеллектуальных измерительных каналов. //Тезисы докладов всероссийской НТК студентов, молодых ученых и специалистов “Биотехнические, медицинские и экологические системы и комплексы”, Рязань, 2002. – С. 52–54.
9. Виноградов А.Л., Голь С.А., Устинов К.С. Повышение точности микропроцессорных измерительных каналов в системах управления бытовой техникой интеллектуальных жилищ. //Современные средства управления бытовой техникой. Материалы V Международной конференции. М.: МГУ сервиса, 2003. – С. 81–82.
10. Виноградов А.Л., Голь С.А., Устинов К.С., Федоров В.Л. Структурно-алгоритмические методы коррекции погрешностей в современных интеллектуальных преобразователях давления. //Автоматизация в промышленности, №11, 2006. – С. 47–50. (Журнал включен в перечень ВАК.)
11. Голь С.А. Автоматизация градуировки интеллектуальных измерительных преобразователей давления. //Автоматизация в промышленности, №11, 2006. – С. 42–46. (Журнал включен в перечень ВАК.)
12. Голь С.А. Прогнозирующая искусственная нейронная сеть для оптимизации градуировки интеллектуальных преобразователей давления. //Материалы всероссийской научно-технической конференции “Измерение, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях”, Бийск, 2005. – С. 58–60.

Соискатель



С.А. Голь