

На правах рукописи

ПОЛИЩУК Игорь Николаевич

**КОРРЕКЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

**Специальность 05.11.16 –
Информационно-измерительные и управляющие системы
(в промышленности)**

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

УФА 2003

Работа выполнена в Уфимском государственном нефтяном техническом университете

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Емец Сергей Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Косолапов Александр Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Гулин Артур Игоревич

Ведущее предприятие: МОАО «Нефтеавтоматика»

Защита состоится «___» _____ 2003 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 Уфимского государственного авиационного технического университета по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке УГАТУ

Автореферат разослан «___» _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д-212.288.02
д.т.н., профессор

Г.Н.Утляков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Информационно-измерительные системы (ИИС) получили широкое распространение в нефтяной и газовой промышленности. Диапазон их применения чрезвычайно велик. Почти все технологические операции, начиная с процессов бурения скважин и заканчивая транспортировкой нефтепродуктов, не мыслимы без использования высокоточной измерительной техники. ИИС применяются для определения параметров газонефтеконденсатных месторождений, характера движения нефти и газа по продуктивным пластам, гидропроводности, пьезопроводности пласта и многих других геологических параметров. Они не заменимы при выборе режима эксплуатации скважины, а также для оперативного контроля работы длинноходовых насосных установок, штанговых глубинных насосных установок и своевременного определения аварийных ситуаций.

Конструктивно ИИС состоят из большого количества элементов, однако их точность, работоспособность и надежность зависят, в основном, от измерительных преобразователей (ИП) и, в частности, от правильного выбора и изготовления датчиков.

В качестве чувствительных элементов ИИС используются разные по своей физической природе датчики. Однако, наибольшее распространение получила технология производства датчиков, использующая полупроводниковые материалы, благодаря высокой чувствительности электрических характеристик полупроводников к различным внешним воздействиям. С помощью полупроводниковых приборов можно преобразовать практически все известные виды энергии. К преимуществам таких преобразователей относятся использование технологии интегральных схем при изготовлении полупроводниковых чувствительных элементов, высокая надежность и долговременная стабильность их параметров.

Достоинства полупроводниковых преобразователей являются вместе с тем и их недостатками. Поскольку чувствительный элемент подобных преобразователей способен воспринимать сразу несколько влияющих величин, измерительная информация оказывается в итоге искаженной, т.е. появляется дополнительная погрешность, вносимая неинформативными параметрами. В качестве примера таких преобразователей можно привести тензометрические преобразователи давления, усилия, датчики Холла, характеристики которых имеют существенную зависимость от изменения температуры окружающей среды.

Перспективным считается применение многоцелевых преобразователей нескольких параметров, что становится возможным за счет выделения в измерительном преобразователе измерительных каналов по числу влияющих величин. Сюда же можно отнести и группы преобразователей, работающих в составе единой измерительной цепи. Особенности подобных преобразователей

являются нелинейность их измерительных каналов, а также взаимное влияние этих каналов друг на друга, что, в свою очередь, приводит к серьезному искажению измерительной информации.

Указанные обстоятельства обуславливают актуальность разработки методов и способов компенсации погрешностей измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом, линеаризации функций преобразования их измерительных каналов и повышения точности информационно-измерительной системы в целом.

Целью настоящей работы является разработка и исследование методов компенсации погрешностей, вызванных нелинейностью и взаимным влиянием измерительных каналов ИП друг на друга, а также апробация их при создании ИИС, не уступающим по метрологическим характеристикам существующим аналогам.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие задачи:

1. Исследование характеристик и определение влияющих внешних и внутренних факторов на метрологические характеристики полупроводниковых измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом.

2. Теоретический анализ и систематизирование известных методов и способов коррекции статических характеристик интегральных измерительных преобразователей с целью установления их потенциальных возможностей.

3. Разработка алгоритмических методов уменьшения погрешностей многоканальных измерительных преобразователей физических величин от влияния неинформативных параметров.

4. Разработка, испытание и исследование метрологических ИИС с целью подтверждения правильности заложенных алгоритмов.

Методы исследования. Поставленные в работе задачи решены с использованием классической теории электрических цепей, теории погрешностей и помехоустойчивости, методов статистической обработки результатов измерений, теории вероятности и численных методов решения нелинейных алгебраических систем уравнений.

На защиту выносятся следующие результаты исследования:

1. Метод коррекции статических характеристик многоканальных измерительных преобразователей.

2. Способ коррекции статических характеристик ИП, позволяющий обрабатывать экспериментальные данные, содержащие промахи и выбросы.

3. Метод градуировки измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом.

4. Измерительный преобразователь давления МТУ, разработанный при непосредственном участии автора и внедренный в промышленность.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

1. Разработанный алгоритмический метод коррекции статических характеристик измерительных преобразователей с произвольным числом влияющих друг на друга измерительных каналов позволяет не только устранить влияние неинформативных параметров на результаты измерения, но и выделить влияющие факторы в качестве дополнительных измеряемых параметров.

2. Разработанный способ обработки экспериментальных данных позволяет упростить процесс определения параметров математической модели измерительного преобразователя путем автоматической коррекции выборок данных, содержащих выбросы и промахи, вплоть до полного исключения их из процедуры расчета.

3. Разработанная методика градуировки измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом позволяет ускорить и упростить процесс определения параметров их математических моделей за счет исключения процедуры стабилизации и измерения значений влияющих факторов.

4. Предложенный метод коррекции статических характеристик измерительных преобразователей с помощью обучающихся систем на основе искусственных нейронных сетей позволяет добиться высоких метрологических характеристик преобразователей в широком диапазоне влияющих величин, а также учесть прогрессирующую погрешность датчиков.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

Разработана ИИС МТУ, представляющая собой программно-аппаратный комплекс и предназначенная для измерения давления и температуры на нефтегазодобывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях, предприятиях теплоэнергетики и водоснабжения, а также для работы в составе систем обнаружения утечек магистральных продуктопроводов.

В настоящее время ИИС внедрена на таких предприятиях, как ОАО «Сургутнефтегаз», ОАО «Газбытсервис», ОАО «ЮганскНИПИнефть», ЗАО «Геотрансгаз, ЗАО «Ханты-Мансийская нефтяная компания», НПО «Буран», ОАО «Самотлорнефтегаз», ОАО «ТНК-Нижневартовск», НПП «Элмаш», ОАО «Уренгойская НГРЭ», ООО «Чегис-М», СП «Татех», ООО «Нефть Поволжья», ТНПВО «Сиам» и др.

Годовой экономический эффект от внедрения МТУ только по ОАО «Сургутнефтегаз» составил 2834562 рубля на один прибор.

Апробация работы. Основные положения проведенных исследований и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- 50 научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Уфа, УГНТУ, 1999);
- XI научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Гурзуф, 1999);

- XII научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Гурзуф, 2000);
- Международная научно-техническая конференция «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, 2000);
- XIII научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Гурзуф, 2001);
- Международная научно-техническая конференция «Датчики и системы» (Санкт-Петербург, 2002);
- XIV научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления» (Гурзуф, 2002);
- Международная научно-техническая конференция «Методы и средства измерения в системах контроля и управления», посвященная памяти заслуженного деятеля науки и техники, д.т.н., профессора Е.П. Осадчего (Пенза, 2002).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 15 печатных работ, из которых 1 статья, 11 тезисов докладов, 1 положительное решение о выдаче патента и 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 183 страницы, 42 рисунка и 17 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, дана общая характеристика выполненной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены выпускаемые серийно отечественной промышленностью датчики и системы измерения давления. Отмечено, что метрологические характеристики лучших приборов далеко не всегда удовлетворяют современным требованиям.

Исследованы полупроводниковые ИП на примере интегральных тензометрических преобразователей (ИТП). Рассмотрены влияющие факторы и определены метрологические характеристики ИТП.

Показано, что для полупроводниковых тензорезистивных преобразователей характерны влияние термических напряжений на аддитивную составляющую температурной погрешности и температурная зависимость чувствительности тензопреобразователей.

Проанализированы существующие способы коррекции статических характеристик ИП. Отмечены основные недостатки пассивных и активных методов уменьшения составляющих температурной погрешности, связанные со сложностью подбора элементов корректирующих цепей, а также с их громоздкостью и ограниченным рабочим диапазоном. В ходе анализа выявлена актуальность проведения работ по созданию алгоритмических способов коррекции статических характеристик ИП, позволяющих улучшить метрологические характеристики и упростить настройку приборов, использующих в качестве первичных преобразователей полупроводниковые датчики.

Во второй главе рассмотрен общий случай математической модели многоканального ИП с влияющими друг на друга измерительными каналами, и определена задача измерения большого количества взаимозависимых параметров. Рассмотрен один из наиболее перспективных подходов к решению этой задачи, а именно, измерение нескольких параметров с помощью одного датчика, воспринимающего сразу несколько влияющих величин, что позволяет упростить устройство ИИС, а также уменьшить ее габариты и стоимость.

Рассмотрены алгоритмические способы компенсации погрешностей ИП, вызванных влиянием неинформативных параметров, один из которых позволяет, в том числе, выделить влияющий фактор и использовать его в качестве дополнительного параметра. Упомянутый метод позволяет решить задачу коррекции взаимного влияния каналов ИП и устранить погрешности от нелинейности их характеристик, являясь в то же время универсальным для любого класса преобразователей. Однако этот метод позволяет осуществить коррекцию для ИП с числом каналов, равным двум.

Указанного недостатка лишен другой, разработанный на его основе, метод. Проиллюстрируем его на примере трехканального ИП, на входе которого действуют величины x_1 , x_2 и x_3 , а на выходе – y_1 , y_2 и y_3 , находящиеся в функциональной зависимости от входных величин ИП. Суть предложенного способа заключается в описании передаточных функций измерительных каналов преобразователя некоторыми аналитическими зависимостями, то есть определении параметров функций $y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3)$, $y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3)$ и $y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3)$. Для этого проводится градуировочный эксперимент, в ходе которого измеряют значения выходных величин преобразователя при различных комбинациях значений его входных величин.

Немаловажное значение имеет форма задания скалярного поля. Для введения коррекции необходимо, чтобы для любых разрешенных значений входных параметров могли быть получены соответствующие значения выходных величин. Рассмотрим один из вариантов задания поля $y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3)$. Для всех значений величины x_1 и всевозможных сочетаний значений величин x_2 и x_3 , участвовавших в градуировочном эксперименте, проводится аппроксимация функций $x_1 = \varphi_1(y_1)$. Результатом аппроксимации будут значения параметров a_j функции $f(y_1)$, индивидуальные для каждой комбинации значений величин x_2 и

x_3 . Тем самым будет описано поведение потенциала значений величины y_1 по x_1 для всех сочетаний значений величин x_2 и x_3 .

Следующим этапом проводится аппроксимация параметров a_j функции $\varphi_1(y_1)$ по величине x_2 . Результатом аппроксимации являются значения параметров b_j функции $\psi_1(a_j)$, индивидуальные для каждого значения величины x_3 . Таким образом, описывается поведение потенциала значений величины y_1 в скалярном поле, образованном величинами x_1 и x_2 , для всех значений величины x_3 . После этого проводится аппроксимация параметров b_j функции $\psi_1(a_j)$ по величине x_3 . В результате аппроксимации получаем значения параметров c_j функции $\xi_1(b_j)$, описывающих функцию поведения потенциала значений величины y_1 в трехмерном скалярном поле $y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3)$. Аналогичным образом задаются поля передаточных функций $y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3)$ и $y_3 = f_3(x_1, x_2, x_3)$.

Итак, ИП описан математической моделью, представляющей собой три набора коэффициентов, определяющих вид передаточных функций для каждого канала преобразователя. Теперь по значениям выходных величин измерительного преобразователя, используя параметры полученной математической модели, можно определить значения его входных величин. Один из возможных способов решения этой задачи заключается в сужении области возможных значений входных величин при заданных значениях выходных величин. Данный процесс является итерационным и сходящимся. Критериями выхода из итерационного процесса могут быть, например, количество циклов, разница между значениями входных величин, рассчитанных на двух соседних итерациях и др. В результате область возможных значений входных величин ИП сузится с некоторой погрешностью до искомым значений x_1, x_2, x_3 .

Таким образом, по значениям выходных величин ИП и заранее определенным параметрам его математической модели можно определить значения входных величин в условиях их взаимного влияния и нелинейности передаточных функций для произвольного числа измерительных каналов.

Апробация предложенного способа проводилась на примере ИП расхода, состоящего из двух тензометрических датчиков давления, включенных последовательно в единую измерительную цепь. Подобная схема включения позволила организовать в преобразователе три влияющих друг на друга измерительных канала: давления, перепада давления и температуры. Использование разработанного способа не потребовало какого-либо усложнения ИП или включения его в более сложную схему. Указанное обстоятельство позволило упростить устройство измерительных каналов, а максимальная приведенная погрешность по каждому каналу при аппроксимации передаточных функций преобразователя полиномами второго порядка не превысила 0,25% во всем диапазоне изменения влияющих величин.

Описанные выше методы позволяют добиться высокой точности при обработке градуировочных данных, не содержащих случайные выбросы. В реальных условиях эмпирические данные, участвующие в градуировочном экспери-

менте, содержат некоторую ошибку измерения, в том числе выбросы или промахи, что отрицательно сказывается при определении параметров математической модели измерительного преобразователя.

Добиться уменьшения погрешности от влияния случайных выбросов экспериментальных данных, полученных в результате градуировочного эксперимента, позволил другой разработанный автором способ.

Рассмотрим его на примере ИП с двумя влияющими друг на друга измерительными каналами. Предположим, что x_1, x_2 – входные величины, а y_1 и y_2 – выходные величины, являющиеся функциями величин, действующих на его входе, т.е. $y_1 = f_1(x_1, x_2)$, а $y_2 = f_2(x_1, x_2)$. Опишем передаточные функции измерительных каналов преобразователя y_1 и y_2 математической моделью согласно рассмотренному выше методу.

Расчетные значения входных величин в узловых точках матрицы экспериментальных данных можно получить путем решения обратной задачи с использованием параметров полученной математической модели. После чего определяются значения погрешностей приближения расчетных значений, полученных в соответствии с математической моделью, к истинным значениям измеряемых величин в узловых точках матрицы экспериментальных данных как разность истинного и расчетного значений входных величин.

Разные способы аппроксимации имеют соответствующие критерии достижения близости аппроксимирующих функций к экспериментальным данным. Так, метод наименьших квадратов в качестве такого критерия использует минимум суммы квадратов отклонений экспериментальных значений от значений, полученных с помощью аппроксимирующей функции.

На следующем этапе реализации способа производят коррекцию параметров математической модели ИП путем повторного ее определения с учетом поправочных коэффициентов, определяемых как величины, функционально связанные со значениями погрешностей в узловых точках матрицы экспериментальных данных. Данные поправочные коэффициенты учитываются в критерии соответствующего способа аппроксимации по достижению оптимального приближения к экспериментальным данным. В частном случае, при использовании в качестве способа аппроксимации метода наименьших квадратов, вместо критерия

$$\min \sum_{i=1}^n [(y_i - f(x_i))^2], \quad (1)$$

используется следующая форма с учетом поправочных коэффициентов:

$$\min \sum_{i=1}^n [(y_i - f(x_i))^2 \cdot k_i]. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) y_i – значение выходных, x_i – значение входных величин, $f(x)$ – аппроксимирующая функция, n – число точек, участвующих в эксперименте, k_i – поправочный коэффициент i -той точки данных, определяемый, в частности, как $k_i = 1/e_i$, где e_i – погрешность приближения в i -той точке матрицы экспериментальных данных.

Процесс определения поправочных коэффициентов, а затем и параметров математической модели, повторяют в итерационном цикле, критерием выхода из которого может служить, например, разность приведенных погрешностей в узловых точках матрицы экспериментальных данных, рассчитанных на двух соседних итерациях.

Предлагаемый способ прошел апробацию при работе с интегральными тензометрическими преобразователями давления. Основной входной величиной в этом случае являлось измеряемое давление, а дополнительным параметром – температура преобразователя. Передаточные функции каждого канала ИП по результатам градуировочного эксперимента аппроксимировались полиномами второго порядка методом наименьших квадратов. В одной из точек градуировочного эксперимента был искусственно введен выброс данных, соответствующий изменению значения давления на 0,75%. После этого с помощью полученных параметров математической модели во всех точках градуировочного эксперимента была решена задача определения пар значений давления и температуры по соответствующим парам выходных величин ИП. Затем, в каждой точке градуировочного эксперимента были рассчитаны погрешности приближения расчетных и экспериментальных значений, представленные на рисунке 1(а) в виде трехмерных диаграмм в координатах давления и температуры. Характерные изгибы поверхности в точке выброса и ее окрестности указывают на высокие погрешности адекватности модели в этих точках.

На рисунке 1(б) показана диаграмма погрешностей определения математической модели измерительного преобразователя по описанной выше методике. В этом случае погрешности приближения в окрестности точки выброса заметно уменьшились, вследствие чего можно считать, что математическая модель измерительного преобразователя определена более корректно.

Сказанное выше подтверждает рисунок 1(в), на котором приведена трехмерная диаграмма погрешностей измерительного преобразователя в узловых точках матрицы экспериментальных данных без выброса, рассчитанных с использованием скорректированных параметров математической модели. Максимальная погрешность адекватности модели в этом случае не превышает 0,02%.

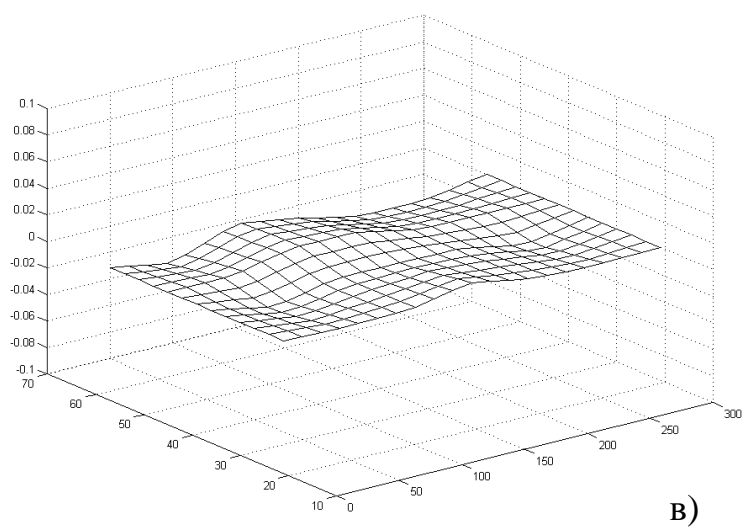
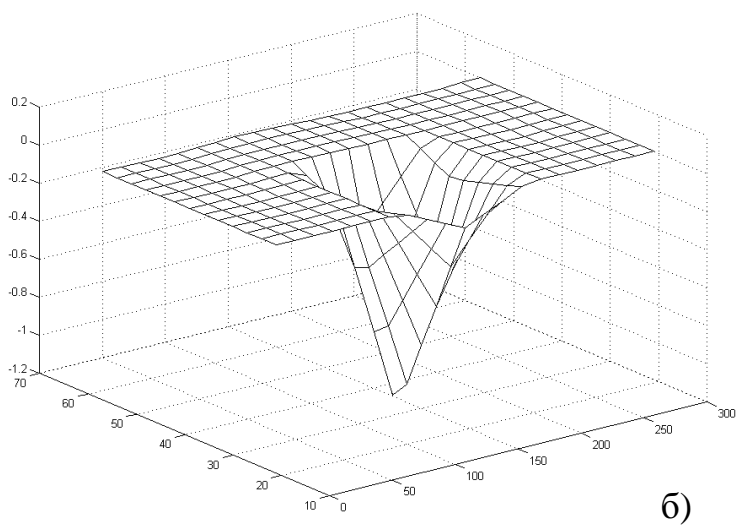
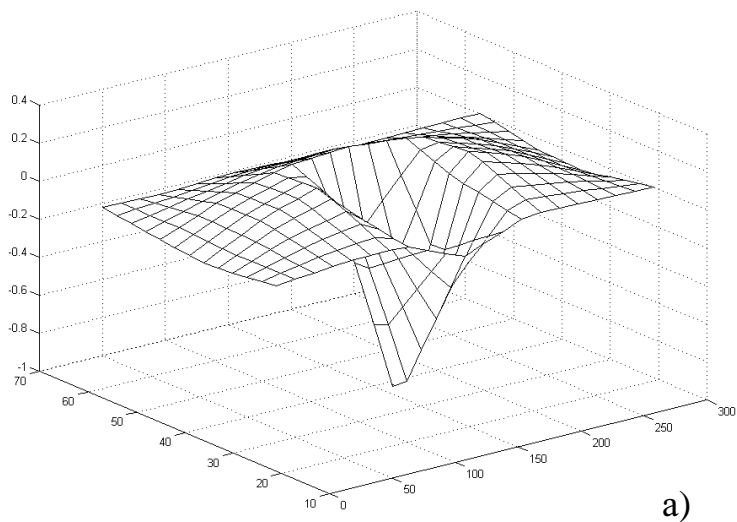


Рисунок 1– Графическая иллюстрация погрешностей ИП

Упомянутые выше методы предполагают проведение градуировочного эксперимента, в ходе которого необходимо точно знать значение влияющего параметра и, кроме того, поддерживать его постоянным на нескольких уровнях в течение определенного времени. В реальных условиях далеко не всегда удастся измерить значение помехи и, тем более, добиться ее стабильности.

В этом случае предлагается воспользоваться другим способом. Рассмотрим общий случай n -канального ИП. Предположим, что X_1, X_2, \dots, X_M – входные информативные параметры, а $X_{M+1}, X_{M+2}, \dots, X_N$ – помехи по отношению к ним. Y_1, Y_2, \dots, Y_N – выходные величины, являющиеся функциями величин, действующих на его входе. Опишем ИП системой уравнений:

$$\begin{cases} Y_1 = f_1(X_1, X_2, \dots, X_{M-1}, X_M, X_{M+1}, \dots, X_N), \\ Y_2 = f_2(X_1, X_2, \dots, X_{M-1}, X_M, X_{M+1}, \dots, X_N), \\ \dots \\ Y_N = f_N(X_1, X_2, \dots, X_{M-1}, X_M, X_{M+1}, \dots, X_N). \end{cases} \quad (3)$$

Определим входные величины X_1, X_2, \dots, X_M по значениям выходных величин Y_i в условиях влияния параметров $X_{M+1}, X_{M+2}, \dots, X_N$. Решая систему уравнений (3) относительно информативных параметров, получим следующие функциональные зависимости:

$$\begin{cases} X_1 = \xi_1(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-1}, Y_N); \\ X_2 = \xi_2(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-1}, Y_N); \\ \dots \\ X_{M-2} = \xi_{M-2}(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-1}, Y_N); \\ X_{M-1} = \xi_{M-1}(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-1}, Y_N); \\ X_M = \xi_M(Y_1, Y_2, \dots, Y_{N-1}, Y_N). \end{cases} \quad (4)$$

Для определения параметров функций ξ_i , проводится градуировочный эксперимент с измерением значений выходных величин ИП. Входные величины при этом необходимо изменять во всем возможном диапазоне. Но, поскольку чувствительный элемент ИП интегрированный, т.е. воспринимает все входные воздействия одновременно, и изменение любой входной величины приводит к мгновенному отклику со стороны выходных величин измерительного преобразователя, нет необходимости стабилизировать влияющие факторы. Для получения параметров математической модели ИП используют значения входных и выходных величин основных каналов и значения выходных величин дополнительных каналов.

Использование разработанного способа градуировки измерительных преобразователей при работе с интегральными тензометрическими преобразователями давления позволило производить измерения давления с приведенной погрешностью, не превышающей 0,25% во всем диапазоне изменения давления и температуры.

Все перечисленные выше способы не учитывают временную нестабильность характеристик ИП. Тем не менее, только дополнительная приведенная погрешность от дрейфа нуля ИП в течение года может достигать 0,1%. В связи с этим, для достижения требуемой точности измерения во всех частях широкого диапазона измеряемых величин, считается перспективным использовать для коррекции статических характеристик самообучающиеся системы на основе искусственных нейронных сетей.

Третья глава посвящена описанию ИИС МТУ, разработанной при непосредственном участии автора на основании полученных в данной работе результатов.

МТУ предназначен для измерения давления и температуры на нефтегазодобывающих и нефтеперерабатывающих предприятиях, предприятиях теплоэнергетики и водоснабжения как автономном, так и в дистанционном.

Структурная схема МТУ приведена на рис. 2. На схеме обозначено: АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, PWR – стабилизатор питания, RTC – таймер реального времени, ППЗУ – энергонезависимая FLASH-память, ЭВМ – электронно-вычислительная машина, ТПД – тензометрический преобразователь давления, ДТ – выносной малоинерционный датчик температуры, ИТ – источник тока, G1 – батарея питания, G2 – литиевый элемент питания, SPI, I²C – внутрисхемные протоколы обмена.

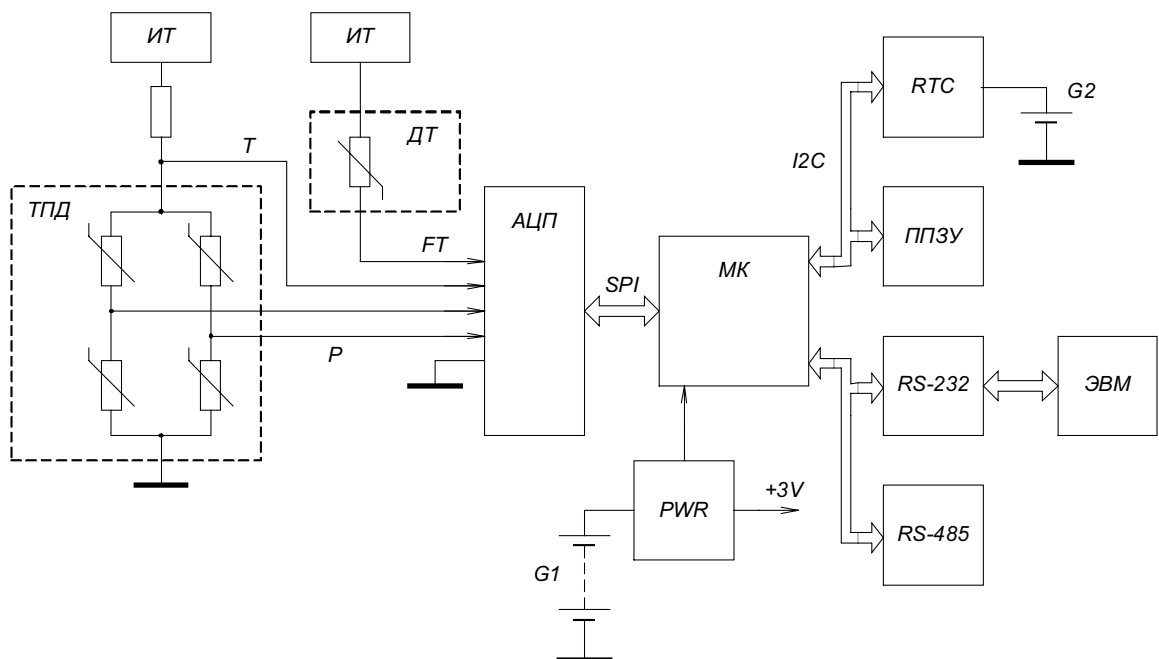


Рисунок 2 – Структурная схема МТУ

Прибор содержит чувствительный элемент питания в виде интегрально тензометрического преобразователя давления (ТПД), включенного в цепь источника тока, состоящего из управляемого источника опорного напряжения и операционного усилителя. Выходной сигнал с ТПД в виде напряжения поступает на один из входов многоканального сигма-дельта АЦП. Ко второму входу АЦП подключен вход измерительной цепи, формирующей напряжение, пропорциональное температуре ТПД, что позволяет в дальнейшем программным путем корректировать температурную погрешность ТПД. Третий вход АЦП подключен к выходу измерительной цепи выносного датчика температуры (ДТ).

Использование разработанного способа градуировки ИП с интегрированным чувствительным элементом позволяет скомпенсировать погрешности, вносимые дрейфом нуля тензометрического преобразователя давления при изменении температуры, а также температурной зависимостью чувствительности ИП. При этом основными источниками погрешностей МТУ являются: погрешности образцовых средств измерения, используемых при градуировке, погрешность аналого-цифрового преобразования, погрешность адекватности модели ИП и временная нестабильность параметров компонентов, а также изменение последних при циклическом воздействии измеряемых величин. Анализ источников этих погрешностей и оценка их значений показали, что максимальная приведенная погрешность МТУ не превышает 0,1%, однако, на основании испытаний во ВНИИМ им. Менделеева она была принята равной 0,25%.

В четвертой главе описана программная оболочка, предназначенная для организации пользовательского интерфейса с измерительным преобразователем давления и определения параметров его математической модели.



Рисунок 3 – Внешний вид программы.

Программа позволяет запускать МТУ в работу с различной дискретностью измерения, считывать и сохранять информацию из памяти прибора с последующим визуальным представлением полученной информации. Отдельным пунктом в программе реализована разработанная автором методика обработки результатов градуировочного эксперимента и определение параметров математической модели измерительного преобразователя.

Высокие метрологические характеристики измерительных преобразователей давления МТУ позволяют использовать их в составе систем обнаружения утечек, предназначенных для контроля целостности газопровода и выявления места и объема утечки на контролируемом участке.

Для промышленных экспериментов выбрали участок магистрального газопровода диаметром 1400 мм в Полянском ЛПУ МГ. В испытаниях участвовали преобразователи давления с пределом измерения 100 кГ/см^2 . Показания преобразователей давления измерительных МТУ сопоставлялись с показаниями датчиков избыточного давления фирмы HoneyWell, широко применяющихся в настоящее время в подразделениях ОАО «Газпром».

В ходе первого испытания последовательно, через временной интервал, равный 1 минуте, открывались шаровые краны отводов труб $\text{Ø}30 \text{ мм}$ каждая. Расстояние от датчиков до кранов составляло при этом около 300 метров. Как видно из рисунка 4(а), измерительные преобразователи давления МТУ зафиксировали перепад давления, равный $0,04 \text{ атм}$. После обработки результатов измерений с помощью программы верхнего уровня с использованием методов цифровой фильтрации данных (рисунок 4(б)) можно наблюдать полки давления, соответствующие изменению давления в системе на 4, 5 и 6 минутах. Датчики избыточного давления HoneyWell не зарегистрировали изменение давления в системе во время эксперимента.

Промысловые испытания и промышленная эксплуатация МТУ подтвердили правильность заложенных алгоритмических и конструктивных решений и показали, что технические и метрологические характеристики МТУ позволяют контролировать технологический процесс перекачки и обнаруживать малейшие его изменения, связанные с возникновением утечек, и могут быть использованы, в том числе, и для управления работой автоматических кранов магистральных газопроводов.

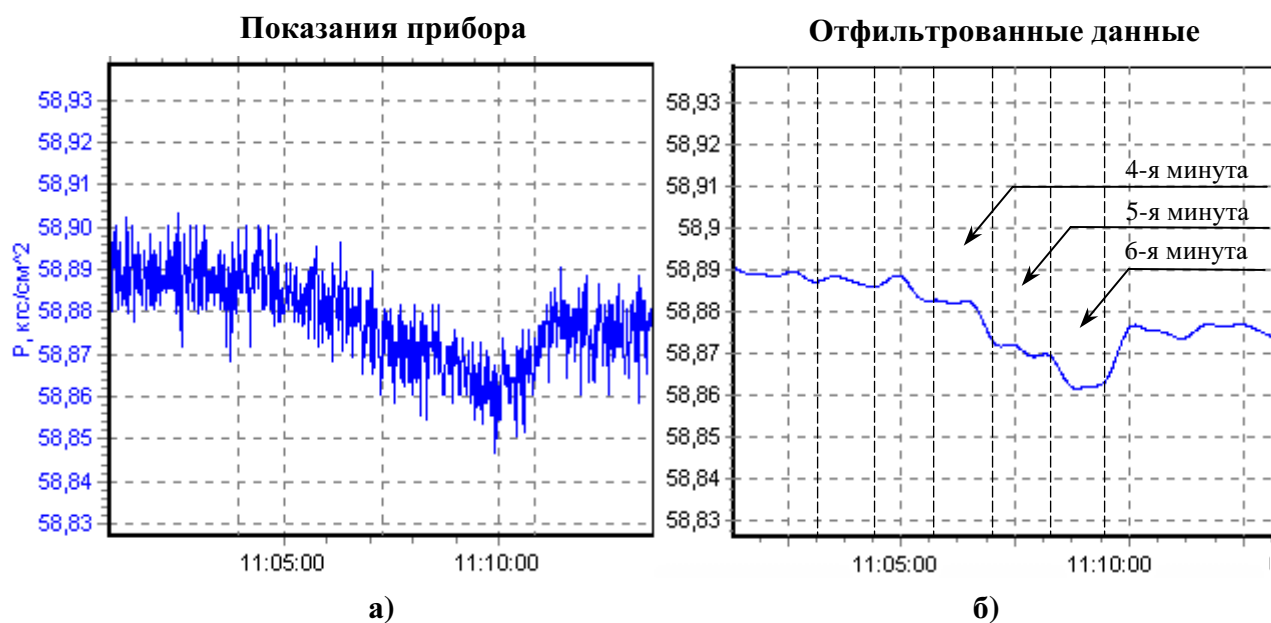


Рисунок 6 – Временные диаграммы изменения давления в газопроводе

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты теоретических, практических и экспериментальных исследований сводятся к следующему:

1. На основании анализа характеристик интегральных тензопреобразователей и схемных методов компенсации аддитивных и мультипликативных составляющих температурных погрешностей ИТП сделан вывод об актуальности алгоритмических способов коррекции статических характеристик измерительных преобразователей.

2. Разработан алгоритмический метод коррекции статических характеристик преобразователей с интегрированным чувствительным элементом, а также его общий случай для преобразователя с произвольным числом влияющих друг на друга нелинейных измерительных каналов. Подана заявка на выдачу патента.

3. Разработан и апробирован способ обработки экспериментальных данных с выбросами и промахами, повышающий точность определения параметров математической модели измерительного преобразователя. Способ защищен патентом РФ на изобретение №2199088 от 20 февраля 2003 г.

4. Предложена методика градуировки измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом, позволяющая ускорить и упростить процесс определения параметров их математических моделей путем исключения процедуры стабилизации и измерения значений влияющих факторов. Получено положительное решение о выдаче патента на изобретение от 24 декабря 2002 года по заявке №2002121952/28(023559) от 16 августа 2002 года.

5. Предложен метод коррекции статических характеристик измерительных преобразователей с помощью обучающихся систем на основе искусственных нейронных сетей, позволяющий добиться высоких метрологических характеристик преобразователей в широком диапазоне влияющих величин. Способ защищен патентом РФ на изобретение №2199089 от 20 февраля 2003 г.

6. При непосредственном участии автора разработан измерительный преобразователь давления МТУ. На прибор получено заключение о взрывозащищенности в ЦС ВЭ ИГД, проведены эксплуатационные испытания. Во ВНИИМ им. Менделеева проведены испытания с целью утверждения типа средства измерения и внесения преобразователей в Государственный реестр средств измерения. Там же успешно пройдены испытания с целью получения сертификата соответствия требованиям безопасности по системе сертификации ГОСТ Р.

7. Разработано программное обеспечение для измерительного преобразователя давления МТУ, соответствующее современным требованиям на программные продукты. В рамках ПО реализованы способ градуировки измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом и обработка экспериментальных данных, содержащих выбросы и промахи.

В настоящее время приборы внедрены на нефтегазовых предприятиях, таких как ОАО «Сургутнефтегаз», ЗАО «Газэнерготехника», ОАО «Юганск-НИПИнефть» и др.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Емец С.В., Латыпов О.А., Полищук И.Н. Алгоритм коррекции статических характеристик многоканальных измерительных преобразователей// Сборник материалов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 23-24.

2. Емец С.В., Полищук И.Н., Латыпов О.А. Многоканальный измерительный преобразователь для расходомера переменного перепада давления// Сборник материалов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 24-25.

3. Емец С.В., Латыпов О.А., Полищук И.Н. Способ коррекции статических характеристик преобразователей с интегрированным чувствительным элементом// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сборник материалов XI Научно-технической конференции. Под ред. Проф. Азарова В.Н. – М.: МГИЭМ, 1999. – С. 171-172.

4. Емец С.В., Полищук И.Н., Латыпов О.А. Коррекция статических характеристик многоканальных измерительных преобразователей систем управления длинноходовыми насосными установками// Прогрессивные технологии в добыче нефти: В сб. науч. трудов. – Уфа, 2000. – С. 98-102.

5. Полищук И.Н., Латыпов О.А., Емец С.В. Расходомер переменного перепада давления// Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Сборник трудов международной научно-технической конференции. – Пенза, 2000. – С. 107-108.

6. Коловертнов Ю.Д., Ганцев А.О., Полищук И.Н. Использование приборов для измерения давления и температуры при гидродинамических исследований скважин// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сборник материалов XII Научно-технической конференции. Под ред. Проф. Азарова В.Н. – М.: МГИЭМ, 2000. – С. 150-151.

7. Емец С.В., Ганцев А.О., Ковшов В.Д., Полищук И.Н., Павлов О.Б. Манометр-термометр универсальный МТУ// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сборник материалов XII Научно-технической конференции. Под ред. Проф. Азарова В.Н. – М.: МГИЭМ, 2000. – С. 165-166.

8. Полищук И.Н., Мамаев Р.Ф., Емец С.В. Возможности микропроцессорного измерительного преобразователя НПП «Грант» при работе с датчиками избыточного давления «Старт»// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сборник материалов XIII Научно-

технической конференции. Под ред. Проф. Азарова В.Н. – М.: МГИЭМ, 2001. – С. 295-296.

9. Полищук И.Н., Мамаев Р.Ф., Емец С.В. Возможность коррекции статических характеристик многоканальных измерительных преобразователей// Датчики и системы: Сборник докладов международной конференции. Том III. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2002. – С. 192-195.

10. Емец С.В., Полищук И.Н. Гидравлический динамометр// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сборник материалов XIV Научно-технической конференции. Под ред. Проф. Азарова В.Н. – М.: МГИЭМ, 2002. – С. 128-129.

11. Аминев Ф.М., Асадуллин М.З., Галиакбаров В.Ф., Емец С.В., Ковшов В.Д., Коробков Г.Е., Полищук И.Н. О возможности использования интеллектуальных датчиков давления в системах контроля утечек магистральных газопроводов// Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления: Сборник материалов XIV Научно-технической конференции. Под ред. Проф. Азарова В.Н. – М.: МГИЭМ, 2002. – С. 129-130.

12. Емец С.В., Полищук И.Н. Формирование математических моделей датчиков в условиях некорректных данных// Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: Сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники, д.т.н., профессора Е.П. Осадчего. – Пенза, 2002. – С. 113-114.

13. Пат. 2199088 РФ, МПК G 01 D 3/02, G 01 R 35/00. Способ коррекции статических характеристик измерительных преобразователей/ Асадуллин М.З., Аминев Ф.М., Галиакбаров В.Ф., Емец С.В., Ковшов В. Д., Коробков Г. Е., Полищук И.Н. – 2002121952/28(023559); Заявлено 11.04.02; Опубл. 20.02.03, Бюл. 5.

14. Пат. 2199089 РФ, МПК G 01 D 3/02, G 01 R 35/00. Способ коррекции статических характеристик измерительных преобразователей/ Асадуллин М.З., Аминев Ф.М., Галиакбаров В.Ф., Емец С.В., Зозуля Ю.И., Ковшов В.Д., Коробков Г.Е., Полищук И.Н., Сибагатуллин Н.М., Сухов Р.В. – 2002121952/28(023559); Заявлено 11.04.02; Опубл. 20.02.03, Бюл. 5.

15. Решение о выдаче патента РФ на изобретение. Способ градуировки измерительных преобразователей с интегрированным чувствительным элементом/ Емец С.В., Полищук И.Н. – 2002121952/28(023559); Заявлено 24.13.02; Опубл. 16.08.02.