

На правах рукописи



БЫЧКОВ ВАЛЕРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ВЫСОКОТОЧНЫЕ АНАЛОГОВЫЕ И ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Томск - 2006

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Евтушенко Геннадий Сергеевич,

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ройтман Марсель Самуилович

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Лапшин Борис Михайлович

Ведущее предприятие: Новосибирский завод полупроводниковых приборов с особым конструкторским бюро
(ФГУП "НЗПП с ОКБ", г.Новосибирск)

Защита состоится «18» апреля 2006 г. В 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.269.09 Томского политехнического университета по адресу: 634028, г.Томск, ул. Савиных, 7, библиотека НИИ интроскопии.

С диссертационной работой можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета по адресу: г.Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «7» марта 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.269.09

доцент, к.т.н.



Б.Б.Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Давление является одним из важнейших параметров, контролируемых в технологических процессах практически всех отраслей народного хозяйства: предприятиях нефтедобывающего и перерабатывающего комплекса, современной энергетики, в т.ч. атомной, металлургии, пищевой промышленности, машиностроения и других отраслей, а также в научных исследованиях, к примеру, в геофизических. Во всех этих случаях измерение давления с более высокой точностью повышает достоверность получаемых результатов измерения. Потребность в приборах измерения давления предприятиями развивающейся промышленности постоянно нарастает и одновременно требует развития их функциональных возможностей, прежде всего встроенных средств передачи данных – аналоговых и цифровых интерфейсов для работы в системах, а также повышения точности. Это достигается применением новых конструкций измерительных преобразователей, схемотехнических решений, а также средств современной цифровой электроники и алгоритмических методов коррекции погрешностей. Вопросы повышения точности измерений, повышения долговременной стабильности метрологических характеристик, расширения функциональных возможностей преобразователей и снижения себестоимости являются закономерными в постоянном эволюционном процессе развития и совершенствования средств измерений. Данная диссертационная работа посвящена исследованиям, направленным на создание новых современных средств измерения давления.

Целью работы является исследование и разработка аналоговых и цифровых высокоточных измерительных преобразователей давления (ИПД).

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

1. Проведение сопоставительного анализа отечественных и зарубежных приборов для измерения давления и обзора существующих технических решений в этой области.
2. Исследование метрологических характеристик тензорезистивных сенсоров давления для получения данных о долговременной стабильности градуировочных характеристик.
3. Создание новых конструкций сенсоров давления, отличающихся повышенной стабильностью, высоким быстродействием, улучшенными весогабаритными параметрами, возможностью массового производства, приемлемой стоимостью.
4. Исследование и разработка схемотехнических и алгоритмических методов уменьшения погрешностей сенсоров давления, позволяющих кардинально уменьшить основную и дополнительные погрешности сенсора и позволяющей создать высокоточные ИПД.
5. Разработка образцов новых высокоточных приборов, ориентированных на серийное освоение. Исследование их характеристик, в том числе проведение опытной эксплуатации для практического подтверждения правильности разработанных решений.

Методы выполнения исследований и оборудование для их проведения. Теоретическая часть работы выполнена с использованием методов: теории вероятностей и математической статистики, теории погрешности, классической теории электрических цепей, математического моделирования и численных методов решения нелинейных алгебраических урав-

нений. При экспериментальных исследованиях использовалось технологическое оборудование ОАО «Манотомь» и ОАО «НИИПП» (г.Томск), ФГУП «СибНИИА им. Чаплыгина» (г.Новосибирск), ООО «Сибирская геофизическая компания». В ряде случаев исследования выполнялись на оборудовании регионального центра метрологии и стандартизации ФГУ «Томский ЦСМ».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. На основе квалитетического анализа большого массива современных приборов измерения давления ведущих отечественных и зарубежных фирм установлено, что наиболее перспективными для разработки и серийного производства являются измерительные преобразователи давления (ИПД) с емкостными и тензорезистивными сенсорами со структурой «кремний на изоляторе» (в частности «кремний на сапфире»).

2. Предложены и исследованы новые конструкции емкостных сенсоров на основе кремниевых профилированных мембран. ИПД на основе таких сенсоров обеспечивают измерение давления с погрешностью не хуже 0,1 %.

3. Предложена и исследована оригинальная конструкция кремниевого мультипликативного сенсора давления. Мультипликативные сенсоры могут применяться в ИПД для измерения давлений в диапазоне частот от статики до 300 ÷ 400 кГц.

4. Использование разработанных математических и схемотехнических методов коррекции погрешностей тензорезистивных сенсоров давления позволяет создавать аналоговые ИПД с основной погрешностью измерения 0,18 % и цифровые ИПД с суммарной погрешностью измерения 0,1 % во всем диапазоне рабочих температур.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

1. Проведенный квалитетический анализ современных отечественных и зарубежных ИПД, позволил определить объективный уровень качества ИПД. Разработана новая методика квалитетического исследования, отличие которой от существующих заключается в том, что, во-первых, в качестве базовых показателей использованы показатели качества идеального современного датчика давления (имеющего лучшие характеристики по всем показателям); во-вторых, ранг приборов определяется как среднее арифметическое значений рангов, рассчитанных с использованием пяти различных целевых функций.

2. Предложены новые конструкции емкостных сенсоров давления на основе кремниевых профилированных мембран с использованием механических свойств кремния. Созданы и исследованы опытные образцы сенсоров.

3. Предложена новая конструкция кремниевого сенсора давления, использующая безмембранный мультипликативный принцип измерения давления. Созданы и исследованы опытные образцы таких сенсоров.

4. Теоретически исследованы различные классы функций для описания передаточной функции сенсоров давления со структурой «кремний на сапфире». Разработана математическая модель, описывающая с высокой точностью передаточную функцию сенсоров данного типа. Адекватность математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями.

Практическая ценность и внедрение результатов работы.

1. Проведенные исследования сенсоров давления со структурой «кремний на сапфире» позволили получить достоверные данные о долговременной стабильности сенсоров. Результаты этих исследований позволили обоснованно устанавливать межповерочный интервал на ИПД с сенсорами данного типа.

2. Предложенный схмотехнический метод компенсации температурной погрешности сенсоров давления со структурой «кремний на сапфире» применен в датчике давления ДМ5007. Датчики внедрены в серийное производство, эксплуатируются на более чем 20 предприятиях.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертации использованы при разработке цифровых манометров ДМ5001 и ДМ5002. Приборы внедрены в серийное производство. В настоящее время цифровые манометры ДМ5001 эксплуатируются на более 80 предприятиях, цифровые манометры ДМ5002 - на 10 предприятиях. Цифровой манометр ДМ5001 защищен патентом РФ на изобретение.

4. Применение разработанной математической модели и разработанной методики градуировки ИПД в цифровом датчике давления ДМ5007МП позволили создать датчик давления, суммарная погрешность измерения которого во всем рабочем диапазоне температур не превышает 0,1 %. Опытная партия цифровых датчиков давления ДМ5007МП в составе скважинных приборов «Геофит КП-90» успешно эксплуатируется на нефтепромысловых объектах ООО «Сибирская геофизическая компания» при исследовании скважин.

5. При исследовании разрабатываемых приборов разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) для настройки и градуировки цифровых ИПД. АРМ используется при производстве серийных цифровых ИПД на ОАО «Манотомь».

Достоверность результатов теоретических исследований и выводов подтверждена экспериментальными исследованиями в аккредитованных Госстандартом испытательных центрах ОАО «Манотомь», ОАО «НИИПП» (г.Томск), ФГУП «СибНИИА им. Чаплыгина» (г.Новосибирск), Томского центра сертификации и метрологии, Государственного центра испытаний средств измерений ВНИИМС Госстандарта РФ (г.Москва), разработок - сертификатами утверждения и соответствия типу средств измерений, опытной эксплуатацией созданных ИПД на Томском ОАО «Манотомь», результатами эксплуатации приборов у потребителей, а также патентами РФ на изобретения.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на межрегиональной научно-технической конференции студентов и молодых ученых в ТУСУР (Томск, 2002), на Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления» в Томском государственном университете систем управления радиоэлектроники (Томск, 2002), на IX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2003), на международном симпозиуме «Новые материалы в сенсорных приложениях» научной сессии Европейского сообщества по исследованию материалов (г.Страсбург, Франция, 2003), на Всероссийской научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2003), научных семинарах кафедры про-

мышленной и медицинской электроники ТПУ и опытно-конструкторского бюро ОАО «Манотомь».

Личный вклад автора заключается в выполнении всех практических исследований, изложенных в диссертации, разработке программ испытаний, проведении испытаний, обработке результатов испытаний емкостных, мультипликативных сенсоров давления и сенсоров со структурой «кремний на сапфире» (КНС-сенсоров), исследовании измерительных преобразователей, проведении квалитметрического анализа датчиков давления, разработке и исследовании математических моделей для описания передаточной функции КНС-сенсоров давления, разработке методики градуировки цифровых ИПД, разработке схем электрических принципиальных и программного обеспечения датчиков давления ДМ5007, ДМ5007МП, цифровых манометров ДМ5001 и ДМ5002, разработке программного обеспечения для настройки и градуировки цифровых ИПД. Постановка задач исследований и общее руководство проводилось совместно проф., д.т.н. Г.С. Евтушенко и к.т.н. Ю.Г. Свинолуповым. Разработка приборов велась под руководством к.т.н., начальника ОКБ ОАО «Манотомь» Ю.Г. Свинолупова, новые конструкции емкостных и мультипликативного сенсоров давления разработаны при научном руководстве заведующего лабораторией микроэлектронных сенсоров ОАО НИИПП д.т.н. Н.П. Криворогова.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 268 наименований, пяти приложений. Работа содержит 214 страниц основного текста, 42 таблицы, 56 рисунков, 172 формулы.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, из них 3 статьи в центральных отечественных изданиях, 1 статья в зарубежной печати, 4 статьи в сборниках статей, 8 тезисов докладов, 3 патента РФ на изобретение. Результаты исследований и разработок изложены также в отчетах о НИОКР и технической документации на разработанные ИПД.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен литературный обзор принципов измерения давления и построения средств измерения давления, методов уменьшения погрешностей сенсоров. Для определения правильных направлений исследований, определения объективных требований к проектируемым датчикам, выявления тех отдельных свойств датчиков давления, которые обуславливают повышение или снижение уровня качества, определения оптимальных соотношений его характеристик, получения объективной количественной оценки качества проведен квалитметрический анализ отечественных и зарубежных ИПД.

При оценке уровня качества приборов применен *комплексный метод*, заключающийся в расчете для каждого образца обобщенного показателя, который выражают функциональной зависимостью от исходных относительных показателей:

$$K = F(g_i, a_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где g_i – i -й относительный показатель качества; a_i – его весовой коэффициент.

Оценка уровня качества ИПД проводилась по методике, состоящей из следующих этапов:

1. Составление первоначального списка показателей.
2. Согласование экспертами списка показателей и определение номенклатуры единичных показателей, по которой следует проводить оценку качества.
3. Ранжирование и определение коэффициентов весовостей единичных показателей качества.
4. Определение значений базовых единичных показателей качества.
5. Определение значений единичных показателей качества оцениваемых образцов.
6. Определение относительных единичных показателей оцениваемых образцов.
7. Расчет комплексного показателя рассматриваемых образцов.
8. Ранжирование приборов по уровню качества, определение лидера.

При определении комплексной оценки качества применяют различные средневзвешенные зависимости (целевые функции) сплошного свойства «качество», причем наибольшее практическое применение получили следующие (*): средневзвешенная арифметическая

$$K = \sum_{i=1}^n a_i g_i, \text{ геометрическая} \quad K = \prod_{i=1}^n (g_i)^{a_i}, \text{ гармоническая} \quad K = \sum_{i=1}^n a_i / \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{g_i}, \text{ квадратические}$$

$$K = \sum_{i=1}^n a_i g_i^2, \quad K = 1 - \sqrt{\sum_{i=1}^n a_i (1 - g_i)^2}.$$

Отличия разработанной методики оценки уровня качества, направленные на повышение достоверности результатов оценки, от существующих состоят в следующем. Во-первых, предложено в качестве базовых показателей качества использовать лучшие показатели среди совокупности участвующих в оценке приборов, а не показатели конкретного перспективного образца, определенного каким-либо образом предварительно. По сути, в качестве базовых показателей использованы показатели качества идеального современного датчика давления. Во-вторых, предложено ранг приборов R_j рассчитывать, используя пять средневзвешенных зависимостей (*). Это обусловлено тем, что задача обоснования «лучшей» формы представления обобщенного показателя качества трудно разрешима, поскольку каждая из пяти функций имеет свои достоинства и недостатки. Ранг приборов предложено рассчитывать как среднее арифметическое пяти значений рангов, рассчитанных с использованием функций (*):

$$R_i = \frac{\sum_j R_{ij}}{5}, \quad (2)$$

где R_{ij} – ранг i -го прибора, рассчитанный по j -ой целевой функции.

Для определения коэффициентов весовости a_i и ранжирования показателей качества применен метод попарного сопоставления. На основании обзора существующих ИПД отечественного и зарубежного производства (рассмотрено 115 приборов, из них 84 зарубежного и 31 отечественного производства) были определены метрологические, функциональные и эксплуатационные характеристики ИПД, определены базовые единичные показатели качества, абсолютные и относительные показатели качества ИПД, участвующих в анализе. Использование предложенной методики, позволяет без проведения предварительного анализа выявить лидера среди совокупности рассматриваемых приборов и определить уровень качества

конкретного прибора, наметить пути дальнейших исследований. Во-первых, отсутствие сведений о долговременной стабильности отечественных датчиков давления, а также отсутствие подтвержденных данных о стабильности КНС-сенсоров давления в открытой печати выдвинули на первый план проведение исследований тензорезистивных сенсоров давления для получения данных о долговременной стабильности градуировочных характеристик. Во-вторых, проведенный обзор показал, что наиболее перспективными для разработки и серийного производства являются измерительные преобразователи давления (ИПД) с емкостными сенсорами, обладающими наибольшей долговременной стабильностью, и тензорезистивными сенсорами со структурой «кремний на изоляторе» (в частности «кремний на сапфире»). Поэтому актуальной задачей является создание новых конструкций сенсоров давления, в том числе емкостных, отличающихся повышенной стабильностью, высоким быстродействием, улучшенными весогабаритными параметрами, возможностью массового производства. И третье направление заключается в проведении исследований и разработки схемотехнических и алгоритмических методов уменьшения погрешностей сенсоров давления, а также разработке образцов новых высокоточных приборов, исследование их характеристик, проведение опытной эксплуатации для практического подтверждения правильности разработанных решений.

Во второй главе приведены результаты исследований первичных преобразователей давления, описаны конструкции сенсоров оригинальной разработки.

Разработана программа исследований, по которой проведены исследования стабильности тензорезистивных КНС-сенсоров давления серийного производства. Для обработки результатов испытаний было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее определять основную погрешность измерений, составляющие основной погрешности, а также стабильность градуировочных характеристик. Повторяемость результатов многочисленных измерений на основании экспериментальных исследований стабильности градуировочных характеристик КНС-сенсоров давления в интервале 12 месяцев составила 0,05 %, что позволяет определить границу погрешности ИПД за временной период и дает основания рекомендовать устанавливать на ИПД класса точности 0,15 межповерочный интервал 1 год.

Целью разработки оригинальных емкостных сенсоров являлось создание первого отечественного сенсора, отличающегося высокой точностью, стабильностью, современными весогабаритными характеристиками, приемлемой стоимостью. Для достижения цели в разработке решались следующие основные задачи:

- достижение высокой механической добротности подвижного электрода;
- снижение влияния температуры на емкость сенсора;
- уменьшение паразитных емкостей.

Кроме того, целью соблюдения высокой конструктивной симметрии сенсора является подавление синфазной электромагнитной наводки.

Для оценки потенциальной точности емкостных сенсоров давления оригинальной разработки автором были проведены испытания опытных партий емкостных сенсоров. Рассмотрена структурная схема датчика давления. Результаты испытаний позволяют сделать вывод о том, что емкостные сенсоры оригинальной разработки могут быть применены для

построения прецизионных датчиков давления класса точности 0,1-0,05 с применением соответствующих алгоритмических методов коррекции погрешностей.

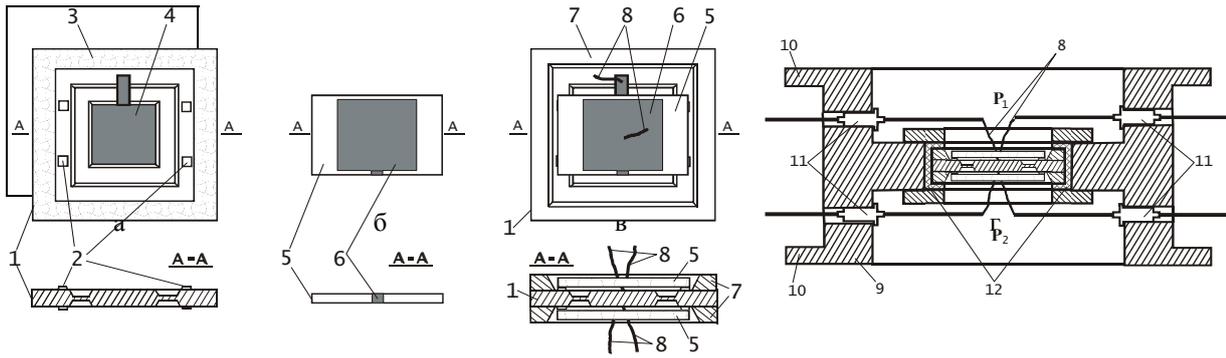


Рисунок 1 - Емкостной сенсор дифференциального давления:

а – мембрана (вид сверху или снизу); **б** – стеклянный электрод (вид сверху или снизу); **в** – мембранный блок (вид сверху или снизу); **г** – собственно сенсор (вид в разрезе; 1 – кремниевая мембрана с выступами 2; 3 – пленка боросиликатного стекла; 4 – металлизация мембраны; 5 – пластина боросиликатного стекла с металлизацией 6; 7 – кремниевые рамки; 8 – микропровода; 9 – корпус из нержавеющей стали с кольцевыми выступами 10; 11 – металлокерамические электрогермовводы; 12 – силиконовый компаунд.

При выполнении диссертационной работы была разработана оригинальная конструкция сенсора давления мультипликативного типа. В разработанном сенсоре полупроводниковый кристалл содержит упругий элемент-выступ в виде замкнутой рамки, а чувствительный элемент выполнен в виде двух тензорезисторов, сформированных в рамке, концентратор выполнен в виде твердотельной пластины, соединенной жестко и вакуумно-плотно с поверхностью рамки. Возможность изготовления оригинального мультипликативного сенсора по планарной кремниевой технологии без индивидуальной калибровки давлением обеспечивает его низкую стоимость, и открывает дорогу к широкому применению предложенных сенсоров в тех областях техники и технологии, где необходима высокая надежность и низкая цена сенсора.

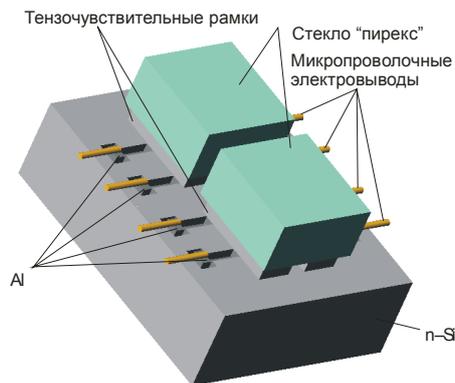


Рисунок 2 - Схематичное изображение мультипликативного сенсора (пропорции не выдержаны)

Разработанные и исследованные на воздействие статического и ударного давлений мультипликативные сенсоры, изготовленные по предложенной технологии, имеют высокую повторяемость электрических характеристик. Они могут быть применены в датчиках для измерения быстропеременного давления (в диапазоне частот до $300 \div 400$ кГц). Сенсоры защищены патентом РФ на изобретение [16].

Третья глава посвящена разработке и исследованиям алгоритмических методов коррекции погрешностей, вызванных нелинейностью и температурной зависимостью сенсоров давления. Теоретически показано, что применение алгоритмических методов коррекции по-

грешности измерения давления и температуры КНС-преобразователя позволяет существенно повысить точность измерения при условии выявления зависимостей выходных сигналов тензопреобразователя от входных измеряемых величин. Разработана математическая модель, описывающая функцию преобразования сенсора давления и учитывающая погрешности сенсора, вызванные нелинейностью и температурной зависимостью, а также разработана методика определения параметров математической модели. Метод наименьших квадратов позволяет построить оптимальную, в смысле соответствия заданному критерию, модель, а также решить вопрос о том, является ли полученная модель адекватной.

Исследования, направленные на определение адекватной математической модели, описывающей передаточную функцию КНС-сенсора давления во всем диапазоне изменения входных давления и температуры, проводились по методике, состоящей из следующих этапов:

1. Проведение градуировочных экспериментов для получения исходных данных.
2. Постановка задачи аппроксимации и определение критерия оценки математических моделей.
3. Расчет коэффициентов математических моделей для каждого сенсора из партии сенсоров, участвующих в испытаниях. Ранжирование математических моделей по выбранному критерию для каждого сенсора. Определение «лучшей» математической модели в смысле установленного критерия оценки.
4. Проверка адекватности математической модели. Проверка значимости коэффициентов.

Для получения исходных данных проводится градуировочный эксперимент, в ходе которого измеряют значения выходных величин сенсоров (напряжения в измерительной U_d и питающей U_m диагоналях тензомоста при питании сенсора от источника тока) при различных комбинациях значений его входных величин: давления P и температуры T . Для введения коррекции необходимо, чтобы для любых разрешенных значений входных параметров могли быть получены соответствующие значения выходных величин. Методами регрессионного анализа были получены коэффициенты ряда математических моделей, описывающих экспериментальные данные. Для расчета коэффициентов математических моделей по экспериментальным данным было использовано специализированное программное обеспечение «DataFit 6.0». Общее число математических моделей, участвующих в «споре» составило 242. Все участвующие в «споре» модели были ранжированы по сумме квадратов отклонений, характеризующей неадекватность моделей. Усредненный ранг каждой модели рассчитывался как среднее арифметическое по совокупности рангов этой модели, полученных при оценке моделей, описывающих экспериментальные данные всех сенсоров давления, участвующих в эксперименте.

По результатам «спора» математических моделей определена наилучшая в смысле точности описания двухфакторная полиномиальная функция вида:

$$P = a_0 + a_1 \cdot U_d + a_2 \cdot U_m + a_3 \cdot U_d^2 + a_4 \cdot U_m^2 + a_5 \cdot U_d \cdot U_m + a_6 \cdot U_d^3 + a_7 \cdot U_m^3 + a_8 \cdot U_d \cdot U_m^2 + a_9 \cdot U_d^2 \cdot U_m, \quad (3)$$

где P – расчетное значение давления, U_d – эквивалент напряжения на измерительной диагонали ТП, U_m – эквивалент напряжения на питающей диагонали ТП, $a_1 \dots a_9$ – параметры модели, определяемые при градуировке.

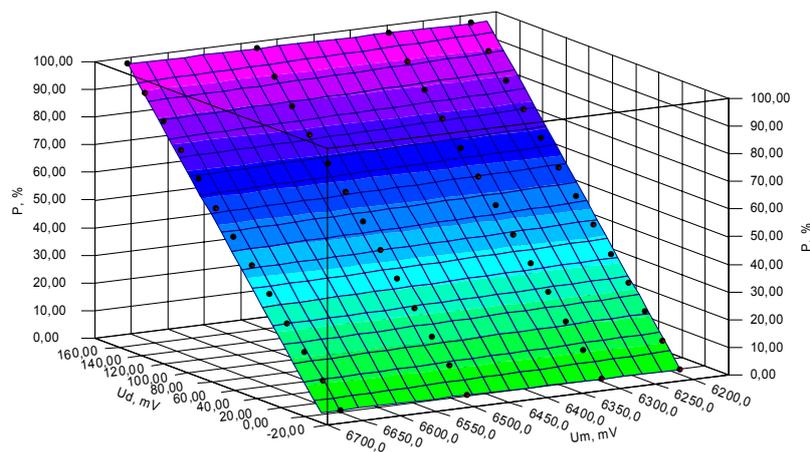


Рисунок 3 - Графическое изображение двухфакторной математической модели, описывающей типовые экспериментальные данные

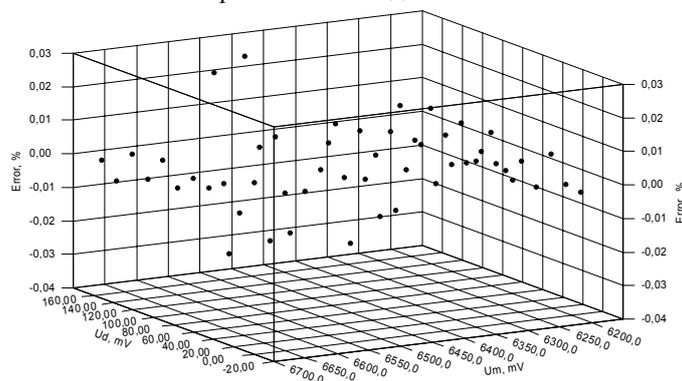


Рисунок 4 - График остатков математической модели

На рис.4 представлен типовой график остатков математической модели, описывающей экспериментальные данные, на котором видно, что никакой явной взаимосвязи разброса ошибок с экспериментальными данными нет и ошибки расположены случайным образом вокруг нуля.

Для проверки гипотезы об адекватности модели было использовано два метода, но в основе обоих методов лежит дисперсионный анализ. Первый метод основан на сопоставлении дисперсии «объяснимых» изменений и дисперсии «необъяснимых» изменений (неадекватности модели), используется для проверки адекватности моделей в пакете прикладных программ «DataFit». Второй метод заключается в сравнении достигнутой точности модели с величиной, характеризующей точность измерений экспериментальных данных.

При этом для использования предлагаемой математической модели в ИПД предложена методика градуировки ИПД, результатом которой являются параметры a_j математической модели (3). Использование разработанной математической модели и методики градуировки в ИПД с тензорезистивными КНС-сенсорами давления позволило производить измерения давления с суммарной погрешностью, не превышающей 0,1 % во всем диапазоне изменения давления и температуры.

В четвертой главе приведены практические результаты исследований и разработки аналоговых и цифровых приборов для измерения давления: датчиков давления ДМ5007 (аналоговый вариант), ДМ5007МП (цифровой вариант), цифровых манометров ДМ5001 и ДМ5002.

Предложен и исследован схемотехнический метод компенсации температурных дрейфов начального сигнала и диапазона выходного сигнала КНС-сенсоров давления серийного производства. Показаны конкретные структуры нормирующих преобразователей. При исследовании датчиков давления ДМ5007 использовалось поверенное оборудование аккредитованного Госстандартом России центра испытаний ОАО «Манотомь». Для решения систем уравнений использовались пакеты прикладных программ MathCad2001, DataFit 6.0, для проведения расчетов элементов принципиальных схем по табличным исходным данным – MS Excel 2000, для выполнения расчетов при настройке датчиков и хранения в базе данных информации по всем выпущенным датчикам и сенсорам – MS Access 2000, для моделирования схем электрических принципиальных – ORCAD 9.1. На рис.5 приведен фрагмент разработанной схемы электрической принципиальной датчика давления ДМ5007, на котором отражено применение схемотехнического метода компенсации температурной погрешности нуля и чувствительности сенсора давления.

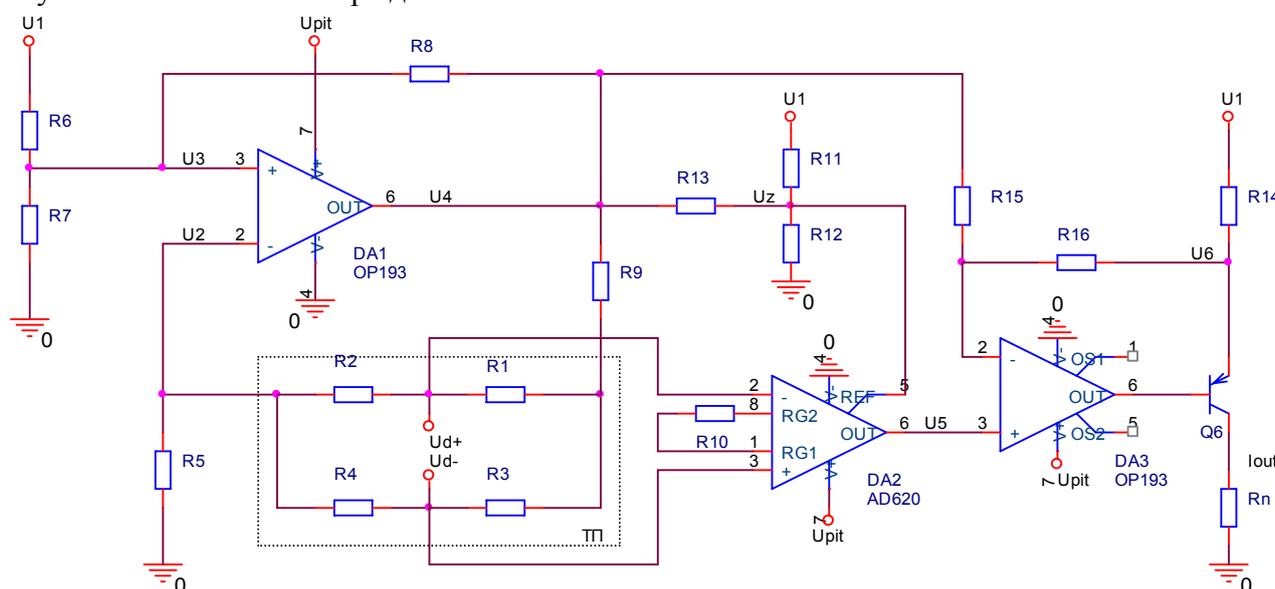


Рисунок 5 – Фрагмент схемы электрической принципиальной датчика давления ДМ5007

Суть предложенного схемотехнического метода компенсации чувствительности заключается в формировании компенсационного тока питания сенсора давления, значение которого является функцией температуры и температурной чувствительности сенсора давления. Экспериментально определив термочувствительность сенсора компенсация сводится к расчету значений номиналов элементов схемы, задающей требуемую функцию тока питания сенсора $I=f(S_t, T)$. Для этого в схеме датчика ДМ5007 на рис.5 на операционном усилителе (ОУ) DA1 реализован преобразователь отрицательного сопротивления, в цепи ООС ОУ включен сенсор давления, ток питания которого определяется из выражения:

$$I = \frac{U_2}{R_5} = \frac{U_2}{R_5 + \frac{R_5 \cdot R_6}{R_7} - \frac{R_6 \cdot R_m}{R_8}}, \quad (4)$$

т.е. ток питания зависит от сопротивления тензомоста R_m ($R_m = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$), которое в свою очередь зависит от температуры сенсора.

Для компенсации термочувствительности сенсора при температуре T_2 ток питания сенсора I^{T_2} должен быть

$$I^{T2} = I^{T1} \cdot \frac{\Delta Ud^{T1}}{\Delta Ud^{T2}}, \quad (5)$$

где ΔUd^T - диапазон выходного сигнала сенсора при температуре T ($T1=+20$ °C, $T2=+70$ °C, $T3=-40$ °C), $\Delta Ud^{T2} = Ud_{P\max}^{T2} - Ud_{P\min}^{T2}$, $\Delta Ud^{T1} = Ud_{P\max}^{T1} - Ud_{P\min}^{T1}$, Ud_P^T - значение выходного сигнала сенсора при температуре T и давлении P и токе питания сенсора $I=1.500$ мА.

Компенсация термочувствительности выходного сигнала сенсора сводится к расчету значений номиналов резисторов R7 и R8 схемы (рис.5), при которых $\Delta Ud^{T1} = \Delta Ud^{T2}$:

$$R7 = \frac{R5 \cdot R6 \cdot (Rm^{T1} - Rm^{T2})}{U1 \cdot \left(\frac{Rm^{T1}}{I^{T2}} - \frac{Rm^{T2}}{I^{T1}} \right) + R5 \cdot (Rm^{T2} - Rm^{T1})}, \quad (6)$$

$$R8 = \frac{R6 \cdot Rm^{T1}}{R5 + \frac{R5 \cdot R6}{R7} - \frac{U1}{I^{T1}}}. \quad (7)$$

Компенсация температурной зависимости начального выходного сигнала сенсора давления сводится к расчету по выведенным зависимостям значений номиналов резисторов R11 и R13 (при $R15=\infty$, $R16=0$) схемы, если выполняется условие $U_0^{T2} > U_0^{T1}$ или R15 и R16 (при $R13=\infty$) схемы, если выполняется условие $U_0^{T2} < U_0^{T1}$, при которых становится справедливым выражение $U_0^{T2} = U_0^{T1}$.

Результаты расчета схемы датчика давления и анализа работы по результатам моделирования позволили сформулировать этапы методики настройки датчика давления, суть которой заключается в проведении предварительного эксперимента для определения индивидуальной температурной зависимости тензочувствительности и начального выходного сигнала сенсора давления и последующего расчета значений номиналов схемы датчика давления. Математические методы, применяемые при настройке датчиков, реализованы в системе СУБД MS Access 2000 на языке VBA, что позволяет кроме выполнения расчетов хранить в базе данных информацию по всем изготовленным датчикам давления ДМ5007 и использованных сенсорах, выполнять статистический анализ, просмотр и редактирование.

По результатам исследования схемотехнического метода компенсации температурной погрешности в 2005 году был переработан электронный блок датчика давления ДМ5007. По вышеприведенной методике за период с января по декабрь 2005 года было настроено и выпущено 1296 датчиков давления. По результатам исследований датчиков давления ДМ5007, в которых применен предложенный схемотехнический метод компенсации температурных погрешностей КНС-сенсоров давления, построены распределения погрешностей (см.рис.6, 7), определены границы основной, дополнительной температурной и суммарной погрешностей датчика давления ДМ5007.

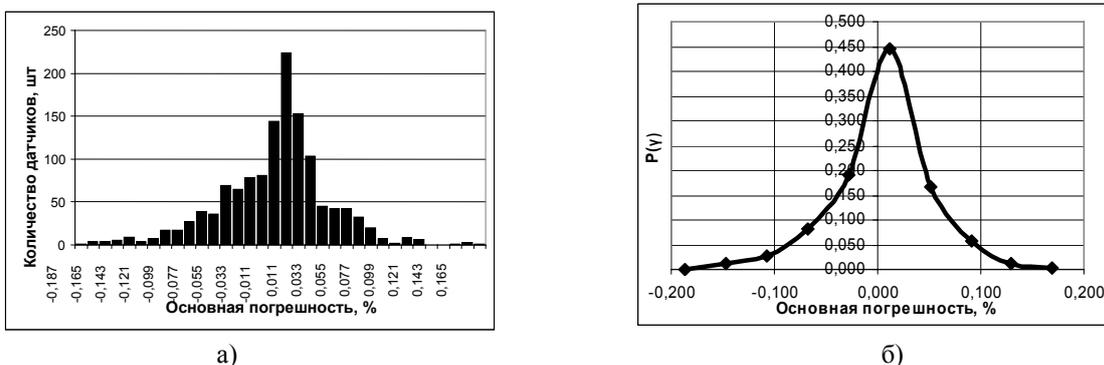


Рисунок 6 - Распределение основной погрешности датчиков (а), распределение вероятности появления датчика с основной погрешностью γ_n (б)

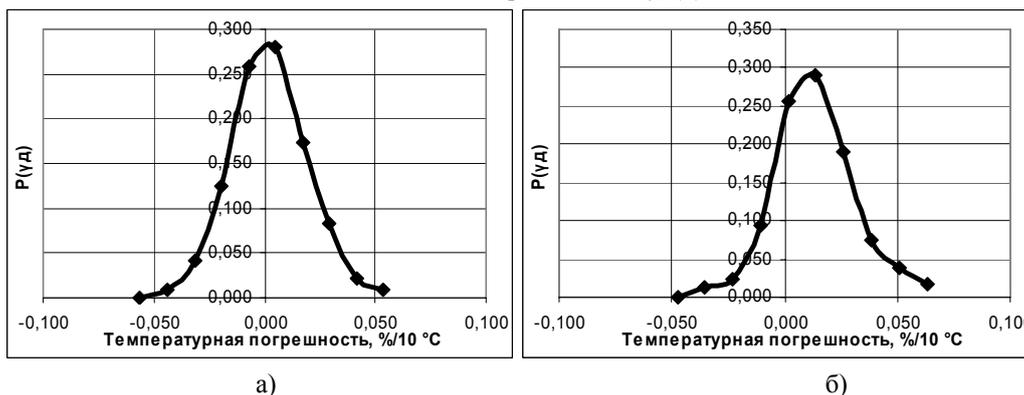


Рисунок 7 - Распределение вероятности появления датчика с температурной погрешностью начального сигнала (а) и чувствительности (б) после компенсации

Границы основной погрешности измерения давления датчиком ДМ5007 составили $\gamma_{осн} = \pm 0,18\%$ с учетом погрешности гистерезиса, нелинейности и нестабильности в течение года. Кроме того, применение предложенного технического решения позволило уменьшить время настройки датчиков, значительно улучшить весогабаритные параметры. Внешний вид датчиков давления ДМ5007 приведен на рис.8. Датчик ДМ5007 внедрен в серийное производство на ОАО «Манотомь». На датчик получено заключение о взрывозащищенности, проведены эксплуатационные испытания, проведены испытания с целью утверждения типа средства измерения и внесения в Государственный реестр средств измерения, получен сертификат соответствия требованиям безопасности по системе сертификации ГОСТ Р.

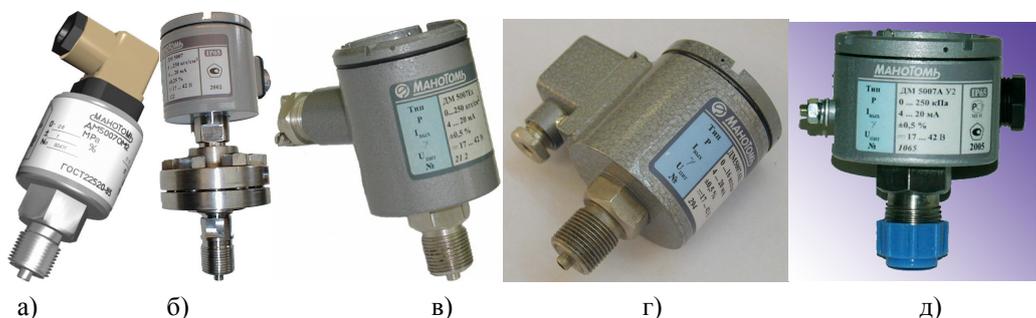


Рисунок 8 – Внешний вид датчиков давления ДМ5007: а – ДМ5007 в обычном исполнении (2001 г.), б – ДМ5007А со средоразделителем (2003 г.), в – ДМ5007Ех – с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка» (2004 г.), г – ДМ5007АЕх – «искробезопасная цепь» (2004 г.), д – малогабаритное исполнение (2005 г.).

Разработанная математическая модель (3) применена в цифровом датчике давления ДМ5007МП. На рис.9а приведена структурная схема датчика давления ДМ5007 МП. На схе-

ме обозначено: ИТ – источник тока, ТП – тензопреобразователь, ППЗУ – энергонезависимая FLASH-память, I²C, SPI – протоколы обмена, СН – стабилизатор напряжения, МК – микроконтроллер, АМП – дифференциальный аналоговый мультиплексор, ПИУ – программируемый инструментальный усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, КВУ – контроллер верхнего уровня («Геофит КП-90»).

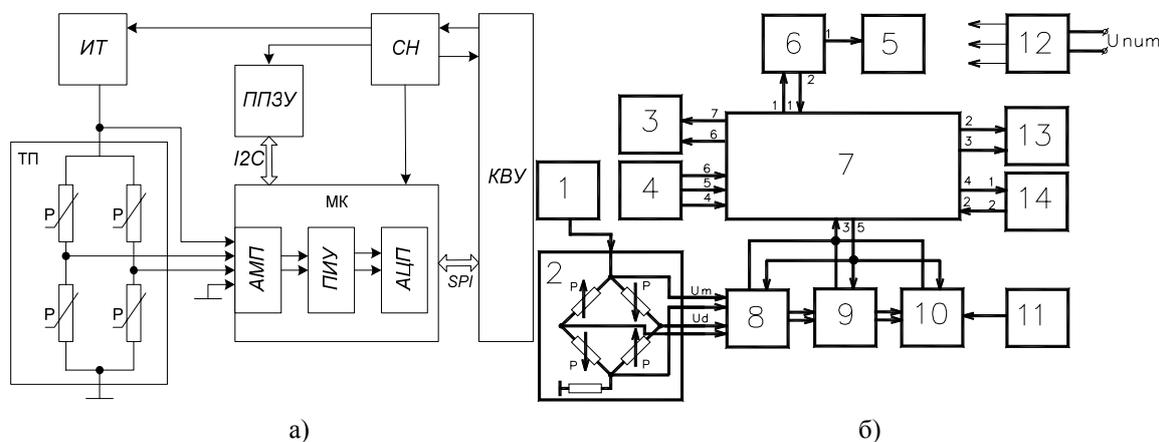


Рисунок 9 – Структурные схемы датчика давления ДМ5007 МП (а) и цифрового манометра ДМ5002 (б)

По результатам испытаний партии цифровых датчиков давления ДМ5007МП типовое значение суммарной погрешности датчиков в рабочем диапазоне температур составило **0,05 %**. Опытная партия цифровых датчиков давления ДМ5007МП успешно эксплуатируется на нефтепромысловых объектах ООО «Сибирская геофизическая компания». На примере датчиков давления ДМ5007МП показано, что использование предложенной методики градуировки и математической модели позволяет производить цифровые датчики давления, суммарная погрешность измерения давления которых не превышает 0,1 % в рабочих условиях эксплуатации.

Полученные положительные результаты эксплуатации цифровых датчиков давления ДМ5007МП стали поводом для использования методики градуировки и математической модели при разработке цифрового манометра ДМ5002, имеющего более широкие функциональные возможности. На рис. 9б изображена структурная схема цифрового манометра ДМ5002. На рис. 9б обозначены: 1 – источник тока; 2 – тензорезистивный преобразователь давления; 3 – цифровой индикатор; 4 – блок управления; 5 – преобразователь напряжение - ток; 6 – цифроаналоговый преобразователь; 7 – микроконтроллер; 8 – аналоговый дифференциальный мультиплексор; 9 – программируемый инструментальный усилитель; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – источник опорного напряжения; 12 – источник питания; 13 - блок сигнализации; 14- цифровой интерфейс.

Цифровые манометры ДМ5002 как рабочие эталоны класса точности 0,15 успешно прошли испытания, проведенные в ФГУ «Томский ЦСМ», по результатам испытаний определены границы погрешности результата измерения давления цифровым манометром ДМ5002, которые составили $\pm 0,09 \%$. На рис.10 показан внешний вид цифрового манометра ДМ5002.



Рисунок 10 – Внешний вид цифрового манометра ДМ5002: а - ДМ5002Ех (2002 г.), б - ДМ5002 (исполнение 2003 г.), в - ДМ5002А (2004 г.), г – ДМ5002Г(2005 г.).

На основе традиционных упругих элементов – манометрической пружине Бурдона построен разработанный цифровой манометр ДМ5001. Для измерения перемещения наконечника манометрической пружины применен индуктивный преобразователь перемещения, выполненный в виде генератора с LC-контуром, индуктивность L которого является функцией от перемещения наконечника пружины. Вторичный электронный микропроцессорный преобразователь выполняет измерение частоты генератора, преобразование измеренного значения частоты в технические единицы измерения давления, отображение измеренного значения давления на локальном индикаторе, управление блоком сигнализации и управление блоками цифрового и аналогового интерфейса. Экономическая эффективность разработки определяется низкой стоимостью прибора, за счет применения не дорогостоящих материалов. Технические характеристики цифровых манометров ДМ5001 подтверждены испытаниями, проведенными в аккредитованном Госстандартом России испытательном центре ОАО «Манотомь», приборы сертифицированы Госстандартом РФ и защищены патентом РФ на изобретение [17].

При исследовании разрабатываемых приборов разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) для настройки и градуировки цифровых ИПД. АРМ представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из программного обеспечения, аппаратных средств задания и поддержания давления и температуры, персонального компьютера и средств сопряжения персонального компьютера с ИПД и средствами задания давления и температуры. Программное обеспечение позволяет считывать и сохранять результаты измерения приборов, изменять эксплуатационные параметры приборов, в том числе считывать и записывать значения коэффициентов математической модели, проводить градуировку цифровых ИПД. Программа является удобной при проведении исследований приборов, особенно при определении долговременной стабильности, так как позволяет с заданной периодичностью (от миллисекунд до часов) регистрировать результаты измерений одновременно группы датчиков давления, цифровых манометров.

Последний раздел четвертой главы посвящен квалитетическому анализу разработанных ИПД. По методике оценки качества, изложенной в первой главе были определены значения абсолютных, относительных и комплексных показателей качества оцениваемых ИПД. Все участвующие в оценке ИПД (30 лучших образцов приборов измерения давления) ранжированы по значению комплексного показателя. Результаты ранжирования ИПД свидетельствуют о том, что поставленная цель диссертации достигнута - воплощенные в разработанных ИПД технические решения позволили создать ИПД высокого уровня качества: пре-

цизионный цифровой манометр ДМ5002 занял 4 место среди лучших приборов данного типа. Это явилось следствием правильно поставленных направлений исследований. Высокий уровень качества цифрового манометра ДМ5002 достигнут благодаря высоким метрологическим характеристикам, расширенными функциональными возможностями при сравнительно меньших весогабаритных характеристиках. Ранг цифрового датчика ДМ5007МП, равный 12, получен вследствие узкой сферы применения этого датчика, даже при высоких метрологических характеристиках. Аналоговый датчик ДМ5007 занял вполне ожидаемое 19 место, более точную оценку качества этого датчика, вероятно, можно получить, рассмотрев при оценке только аналоговые датчики. Цифровой манометр ДМ5001, занявший 24 место, имея достаточно расширенные функциональные возможности проигрывает основной массе оцениваемых ИПД по метрологическим характеристикам.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

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

1. Разработана методика квалитметрического исследования, на основании которой впервые был проведен квалитметрический анализ отечественных и зарубежных ИПД, позволивший определить объективный уровень качества ИПД и наиболее перспективные направления развития ИПД.
2. Проведены исследования сенсоров давления со структурой «кремний на сапфире», позволившие получить достоверные данные о долговременной стабильности сенсоров и обоснованно устанавливать межповерочный интервал на ИПД с сенсорами данного типа.
3. Разработаны оригинальные конструкции емкостных и мультипликативных сенсоров давления. Проведены исследования опытных образцов, показано, что такие сенсоры могут быть применены для создания высокоточных ИПД.
4. Предложенный схмотехнический метод компенсации температурной погрешности сенсоров давления со структурой «кремний на сапфире» применен в серийно освоенных датчиках давления ДМ5007. Границы основной погрешности измерения давления датчиком ДМ5007 на основании проведенных исследований датчиков составили $\gamma_{осн} = \pm 0,18 \%$ с учетом погрешности гистерезиса, нелинейности и нестабильности в течение года.
5. Разработана адекватная математическая модель, описывающая передаточную функцию КНС-сенсоров давления при питании постоянным током. Разработана методика градуировки цифровых ИПД для определения коэффициентов их математических моделей. Использование разработанной математической модели и методики градуировки цифровых ИПД в цифровом датчике давления ДМ5007МП позволили создать ИПД, суммарная погрешность измерения которого во всем рабочем диапазоне температур не превышает 0,1 %.
6. Разработаны цифровые манометры ДМ5001 и ДМ5002, проведены исследования метрологических характеристик, определены границы суммарной погрешности результата измерения давления цифровым манометром ДМ5002, которые составили $\gamma_{\Sigma} = \pm 0,09 \%$. Цифровые манометры внедрены в серийное производство.
7. При исследовании разрабатываемых приборов разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) для настройки и градуировки цифровых ИПД. АРМ используется при производстве серийных цифровых ИПД на ОАО «Манотомь».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Свинолулов Ю.Г., Криворотов Н.П., Бычков В.В. Прецизионные цифровые измерители избыточного давления // Электронная промышленность. -2002, №2/3.- С.73-75.
2. В.В. Бычков. Прецизионный цифровой датчик давления ДМ5002Ех // Материалы докладов межрегиональной научно-технической конференции студентов и молодых ученых. -Томск: ТУСУР, 2002.- С.235-238.
3. В.В. Бычков. Датчик давления ДМ5007 // Материалы докладов межрегиональной научно-технической конференции студентов и молодых ученых. -Томск: ТУСУР, 2002.- С.238-241.
4. В.В. Бычков. Цифровой манометр ДМ5001 // Материалы докладов межрегиональной научно-технической конференции студентов и молодых ученых. -Томск: ТУСУР, 2002.-С.241-243.
5. Бычков В.В., Машкин А.А. Взрывозащищенные электронные измерители давления ОАО «Манотомь» // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции: В двух томах. Том 2. -Томск: ТУСУР, 2002. –С. 56-58.
6. Бычков В.В. Микропроцессорные измерители давления ОАО «Манотомь» // Проблемы современной радиоэлектроники и систем управления: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции: В двух томах. Том 2. -Томск: ТУСУР, 2002. –С. 59-61.
7. Svinolupov Yu.G., Bychkov V.V. Pressure Control Devices With The Microprocessor error correction // Proceedings of the ninth International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists “MODERN TECHNIQUES AND TECHNOLOGIES” (MTT’2003).-TomsK: TPU, 2003.-С.64-66.
8. N.P. Krivorotov, Yu.G. Svinolupov, T.I. Izaak, V.V. Bychkov. DIAPHRAGMLESS PRESSURE SENSOR. E-MRS Spring Meeting 2003, June 10 - 13, 2003. SYMPOSIUM N. New materials and technologies in sensor applications.
9. N.P. Krivorotov, Yu.G. Svinolupov, T.I. Izaak, V.V. Bychkov. DIAPHRAGMLESS PRESSURE SENSOR. Sensors and Actuators A: Physical . Volume 113, Issue 3 , 16 August 2004, Pages 350-354.
10. Бычков В.В., О.Х.Ким, А.И.Солдатов, П.В.Сорокин, С.А.Цехановский. Станция управления электронасосом артезианской скважины // Электронные средства и системы управления: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. -Томск: Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, 2003. С.52-53.
11. Ю.Г. Свинолулов, Н.Н.Подкопаев, В.В.Бычков. Датчики давления ДМ5007. Опыт разработки и серийного освоения //Достижения науки – производству: Сборник статей. –Томск: ТУСУР, 2003. -С. 63-69.
12. Ю.Г.Свинолулов, В.В.Бычков. Процессорные датчики давления и цифровые манометры //Достижения науки – производству: Сборник статей. –Томск: ТУСУР, 2003. -С. 69-85.

13. Ю.Г.Свинолулов, Т.И. Изаак, Л.М.Ромась, В.В.Бычков. Измерительные преобразователи давления //Достижения науки – производству: Сборник статей. –Томск: ТУСУР, 2003. -С. 155-171.
14. Ю.Г.Свинолулов, В.В.Бычков. Автоматизированное рабочее место для настройки процессорных датчиков давления //Достижения науки – производству: Сборник статей. –Томск: ТУСУР, 2003. -С. 171-175.
15. Ю.Г.Свинолулов, В.В.Бычков. Датчики давления и цифровые манометры ОАО «Манотомь» // Приборы. -2004, №5. -С.37-40.
16. Пат.2247342 РФ, МПК G 01 L 9/06. Мультипликативный микроэлектронный датчик давления (варианты) / Криворотов Н.П, Изаак Т.И., Свинолулов Ю.Г., Ромась Л.М., Иванов Е.В., Бычков В.В. – 2003125016/28; Заявлено 11.08.2003; Оpubл. 27.02.2005, Бюл. №6.
17. Пат. 2267095 РФ, МПК G 01 L 7/04. Устройство для измерения давления / Свинолулов Ю.Г., Бычков В.В. – 2004120225/28(021701); Заявлено 01.07.2004; Оpubл. 27.12.2005, Бюл. №36.
18. Пат. 2255246 РФ, МПК F04D15/00, F04C15/04, F04B49/00. Устройство управления электронасосами артезианских скважин/Солдатов А.И., Цехановский С.А., Сорокин П.В., Бычков В.В., Ким О.Х. – 2003130350/06; Заявлено 14.10.2003; Оpubл. 27.06.2005, Бюл. №18.
19. Свинолулов Ю.Г., Светлаков А.А., Бычков В.В., Пронин А.С. Исследование некоторых классов функций для аппроксимации выходной характеристики тензопреобразователей давления // Приборы. -2005, №9. -С.29-41.