

На правах рукописи

Емельянов Григорий Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ
МИНИМИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ
ПОГРЕШНОСТЕЙ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ
С ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ
СТРУКТУР «КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ»**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(измерения электрических и
магнитных величин)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2013

Работа выполнена на кафедре САПР Ульяновского государственного технического университета.

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент,
Киселев Сергей Константинович

Официальные оппоненты:

Сергеев Вячеслав Андреевич,
доктор технических наук,
Ульяновский филиал ИРЭ им. В.А.Котельникова
РАН, директор

Ефимов Александр Владимирович,
кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Ульяновское высшее авиационное училище
гражданской авиации (институт)»

Ведущая организация – **ОАО «Ульяновское конструкторское бюро
приборостроения», г. Ульяновск**

Защита диссертации состоится «13» февраля 2013 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

Автореферат разослан «14» января 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

Смирнов Виталий Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема повышения точности измерительных преобразователей физических величин постоянно сопутствует развитию науки, промышленности, транспорта и других отраслей экономики. В последнее время требования к точности датчиков давления, используемых в различных системах контроля и управления (например, системы учета и контроля расхода газа), особенно возросли. Главной проблемой для полупроводниковых датчиков механических величин, к которым относятся датчики давления с тензопреобразователями (ТП) на основе структур «кремний на сапфире» (КНС), является сильная зависимость их метрологических характеристик от температуры. Поскольку температура является одним из самых распространенных дестабилизирующих факторов в процессе эксплуатации датчиковой аппаратуры, то вопросы разработки и исследования методов уменьшения температурных погрешностей являются наиболее актуальными.

Для уменьшения влияния температуры на результаты измерений разработано большое количество физико-технологических и конструктивных методов, которые позволяют наиболее полно уменьшить погрешности в широком диапазоне условий эксплуатации, и которые не требуют индивидуальной работы с каждым ТП и наилучшим образом совместимы с массовой групповой технологией производства ТП. Однако особенности электрофизических характеристик полупроводниковых материалов, а также неизбежный технологический разброс этих характеристик приводят к тому, что для получения высокоточных датчиков механических величин наряду с физико-технологическими и конструктивными методами часто приходится использовать схемотехнические методы. И если к настоящему времени вопросы использования аналоговых схем компенсации температурных погрешностей рассмотрены достаточно подробно, то вопросам применения цифровых методов, которые начали использоваться сравнительно недавно и появление которых неразрывно связано с широким развитием однокристалльных микроконтроллеров (МК) с малым энергопотреблением и энергонезависимой памятью, прецизионных аналого-цифровых преобразователей, уделено не так много внимания. Актуальность цифровых методов компенсации температурной погрешности объясняется еще и тем, что при одинаковой трудоемкости с широко распространенными схемными методами они позволяют получить датчики с большей точностью. Кроме того, использование МК, кроме компенсации температурной погрешности, позволяет расширить возможности датчика, добавив ряд функций (например, функции самодиагностики, функции форматирования и т. д.).

Цель диссертационной работы – повышение точности датчиков давления с ТП на основе структур КНС путем разработки новых цифровых методов компенсации температурной погрешности и методик калибровки приборов.

Достижение поставленной цели обеспечивалось решением следующих задач:

1. Анализ методов компенсации температурной погрешности датчиков давления с ТП на основе структур КНС.
2. Экспериментальная оценка эффективности существующих цифровых методов компенсации температурной погрешности в применении к датчикам давления на основе структур КНС.
3. Определение путей совершенствования существующего и разработки нового математического обеспечения (МО – математические модели температурной погрешности и алгоритмы ее определения) цифровых методов компенсации температурной погрешности датчиков давления с ТП на основе структур КНС.
4. Модификация существующего МО датчика на основе полиномиального представления обратной функции преобразования ТП.
5. Разработка МО датчика на основе прямой функции преобразования ТП.
6. Разработка методик калибровки датчиков.
7. Реализация разработанного МО и оценка его эффективности на опытной партии датчиков давления с ТП на основе структур КНС.

Методы выполнения исследований. Работа выполнена с использованием методов математического моделирования, теории расчетов электрических цепей и обработки результатов измерений. Достоверность разработанных научных положений и выводов подтверждена результатами опытных испытаний на образцах общепромышленных датчиков давления.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлено, что используемое в существующем техпроцессе калибровки серийных датчиков давления полиномиальное представление обратной функции преобразования ТП не позволяет получать приборы с погрешностью измерения ниже 0,075 %.
2. Предложено для калибровки датчиков использовать прямую функцию преобразования ТП, а температурные зависимости ее составляющих аппроксимировать параболическими или кубическими сплайнами.
3. Разработано МО датчиков на основе прямой и обратной функций преобразований ТП с аппроксимацией их составляющих с помощью сплайнов и определены основные параметры процесса калибровки (требуемое количество точек, их распределение в диапазоне давлений и температур), позволяющие получать приборы с погрешностью измерения не более 0,05 % во всем рабочем диапазоне температур
4. Предложена методика калибровки серийных датчиков с меньшим количеством измерений, позволяющая на основе совместного использования данных первых технологических испытаний ТП и

данных калибровки, получать приборы, эквивалентные по точности откалиброванным на большем количестве температур.

Практическая ценность работы заключается:

1. В разработанном цифровом алгоритме компенсации температурных погрешностей ТП на основе структур КНС, ориентированном на реализацию в однокристалльных микроконтроллерах с малым энергопотреблением, встраиваемых в датчики давления.
2. В снижении трудоемкости процесса калибровки серийно выпускаемых датчиков давления при использовании предложенной методики калибровки на основе совместного использования данных первых технологических испытаний ТП и данных калибровки.
3. В оценке эффективности применения цифровых методов фильтрации сигнала с ТП и обосновании достаточности использования 16-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) для построения датчиков давления с погрешностью 0,05 %.
4. В том, что проведенные в работе исследования и разработки в совокупности позволяют серийно производить датчики давления с более высокими метрологическими характеристиками (погрешность измерения не более 0,05 % во всем рабочем диапазоне температур).

Реализация результатов работы. Полученные научные и практические результаты были использованы в ЗАО «Микроэлектронные датчики и устройства» (ЗАО МИДАУС) г. Ульяновск при разработке серии датчиков давления МИДА-15 с цифровым выходным сигналом.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты исследований докладывались и получили положительную оценку на научно-технической конференции преподавательского состава УлГТУ (2011 г.), ежегодных международных научно-практических конференциях «Энергоресурсосбережение. Диагностика» (г. Димитровград, 2009, 2011-2012 гг.), 3-й Российской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2011 (г. Ульяновск, май 2011), 1-й Всероссийской научно-практической конференции (г. Ульяновск, сентябрь 2011).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальной и теоретической оценки точности температурной коррекции показаний датчиков давления при использовании полиномиальной представленной обратной функции преобразования ТП и аппроксимации ее оставляющих интерполяционными полиномами (полиномами Ньютона и Лагранжа, ортогональными полиномами Чебышева и Форсайта, параболическими и кубическими сплайнами).
2. МО датчиков давления на основе прямой функции преобразования тензопреобразователя, использующее для описания температурных зависимостей ее составляющих параболические и кубические

- сплайны, которое позволяет получать приборы с погрешностью измерения не более 0,05 % во всем рабочем диапазоне температур.
3. Основные параметры процесса калибровки (требуемое количество точек, их распределение в диапазоне давлений и температур) и методика калибровки серийных датчиков с меньшим количеством измерений.
 4. Результаты экспериментальной проверки значений погрешностей датчиков, использующих разработанное МО и методику калибровки.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 1 статья в научном журнале из перечня ВАК РФ, 6 материалов и тезисов докладов.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, в которые вынесены некоторые результаты проведенных экспериментов. Основной текст диссертации содержит 167 машинописных страниц, 63 рисунка и 6 таблицы. Список литературы включает 62 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и задачи научного исследования, определены направления ее решения, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ физических основ образования температурной погрешности ТП на основе КНС. При рассмотрении механизмов возникновения температурной погрешности были отдельно рассмотрены ее составляющие: аддитивная (АТП) и мультипликативная (МТП) температурные погрешности. Для АТП и МТП анализ показал, что:

1. На механическом этапе преобразования причиной возникновения АТП являются тепловые деформации полупроводникового чувствительного элемента (ПЧЭ), возникающие из-за разницы коэффициентов температурного расширения материалов ПЧЭ и деталей корпуса ТП или связующего, неоднородности ПЧЭ и неравномерного разогрева ПЧЭ током, протекающим через измерительную цепь (ИЦ). Причиной возникновения МТП является температурная зависимость коэффициента упругого преобразования, которая, определяется температурным изменением упругих постоянных материалов ТП и ПЧЭ.
2. На механо-электрическом этапе АТП вызывается разницей в величине сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) тензорезисторов, находящихся в смежных плечах мостовой ИЦ. Основной вклад в МТП вносит температурная зависимость коэффициента тензочувствительности ПЧЭ, связанная

с температурной зависимостью коэффициентов эластосопротивления материала тензорезисторов.

3. Величина АТП и МТП изменяется в зависимости от вида питания мостовой тензосхемы. Так несбалансированный мост при питании от генератора тока имеет повышенный температурный дрейф нуля по сравнению с питанием от генератора напряжения.

Все существующие методы компенсации температурной погрешности датчиков давления можно разделить на три категории: физико-технологические (оптимальный выбор физических характеристик полупроводникового материала тензорезисторов), конструктивно-технологические (оптимизация формы и размеров УЭ; формы, размеров и расположения тензочувствительной схемы на ПЧЭ; наличие в тензочувствительной схеме элементов компенсации погрешностей, выполненных в процессе изготовления ПЧЭ), схемотехнические (подключение индивидуально подбираемых пассивных элементов или введение компенсирующих элементов в активные схемы преобразования сигнала).

Наиболее эффективными и наиболее полно исследованными и описанными являются методы, относящиеся к первым двум категориям. Они применяются к ТП датчика и позволяют наиболее полно уменьшить погрешности в широком диапазоне условий эксплуатации. Кроме того, эти методы не требуют индивидуальной работы с каждым ТП и наилучшим образом совместимы с массовой групповой технологией производства ПЧЭ и ТП.

Методы третьей группы, которые можно разделить на пассивные и активные, аналоговые и цифровые схемы компенсации, требуют многократных испытаний ТП и индивидуальной настройки каждого прибора. В силу обычно сложных зависимостей сопротивления и тензочувствительности полупроводника от воздействующих на него факторов, схемотехническая компенсация температурной погрешности, как правило, эффективна в ограниченном диапазоне значений дестабилизирующих факторов. Вместе с тем, приходится учитывать, что особенности электрофизических характеристик полупроводниковых материалов, а также их неизбежный технологический разброс приводят к тому, что для получения высокоточных датчиков наряду с физико-технологическими и конструктивными методами часто приходится использовать и схемотехнические.

Наибольший интерес среди схемотехнических методов представляют активные цифровые методы компенсации температурной погрешности, что вызвано, в первую очередь, сравнительно недавним их появлением и значительно меньшей проработанностью по сравнению с другими методами. Во-вторых, как показывает практика их использования при трудозатратах, соизмеримых с традиционными схемными методами компенсации, они позволяют получить большую точность, добавив целый ряд дополнительных функций в датчик.

Основой всех цифровых методов коррекции является метод вспомогательных измерений, который заключается в получении информации о внешних влияющих факторах (ВВФ) с последующим ее использованием для

коррекции погрешности измерения основной физической величины. В случае датчиков давления с полупроводниковыми ТП основным ВВФ является температура. Для измерения температуры ТП может использовать температурный элемент, интегрированный в ТП (терморезистор, термометр сопротивления или полупроводниковый диод), или, как в случае ТП на основе структур КНС, сама тензосхема, сопротивление которой функционально связано с температурой.

На рис. 1 показана типовая структурная схема датчика давления, в котором реализован цифровой метод коррекции температурной погрешности. Температура ТП определяется по величине сопротивления тензосхемы.



Рис. 1. Структурная схема датчика давления с цифровым методом коррекции температурной погрешности

Измеряемое давление P преобразуется в напряжение U_p , снимаемое с диагонали тензосхемы. U_p подается на один из входов АЦП для его преобразования в код N_p . Для получения информации о температуре в цепь питания тензосхемы включен термнезависимый резистор R_T , падение напряжения U_T на котором функционально связано с температурой ТП. Напряжение U_T подается на второй вход АЦП для его преобразования в код N_T .

Коды N_p и N_T , соответствующие напряжениям U_p и U_T , периодически считываются из АЦП в МК, который осуществляет расчет измеряемого значения давления по формуле:

$$P_C = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k a_{i,j} \cdot N_p^i \cdot N_T^j, \quad (1)$$

где $a_{i,j}$ – калибровочные коэффициенты, которые находятся в процессе индивидуальной калибровки датчика методом тестовых воздействий; n и k – степень полинома, которая выбирается, исходя из теоретических соображений или на основе экспериментальных данных на этапе изготовления опытной партии датчиков (обычно $n=k=2$).

Рассчитанное значение давления P_C либо преобразуется в соответствующий код N цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), и на выходе формируется аналоговый сигнал (ток или напряжение), пропорциональный измеренному давлению; либо выдается в цифровом виде по определенному интерфейсу (например, UART или RS-485)

Описанный метод позволяет корректировать как основные, так и дополнительные температурные погрешности аддитивного и мультипликативного характера всех функциональных узлов датчика и в первую очередь ТП. Кроме того такой подход позволяет минимизировать погрешность нелинейности ТП. Испытания отдельных образцов датчиков показывают, что приведенная погрешность измерения в диапазоне температур от -40 до 80 °С может быть снижена до $\pm 0,1$ %. Вместе с тем, анализ результатов серийного производства датчиков МИДА-13ПК (рис. 2) и МИДА-15 (рис. 3) (ЗАО МИДАУС), в которых для компенсации температурной погрешности используется цифровой метод, показывает, что получение погрешности $\pm 0,1$ % и ниже затруднительно (среднее значение погрешности составляет $\pm 0,18$ % для датчиков МИДА-13ПК и $\pm 0,076$ % для датчиков МИДА-15). В первую очередь это касается датчиков с аналоговым выходным сигналом и датчиков, предназначенных для измерения низких давлений. Получение датчиков с погрешностью $\pm 0,1$ % и ниже в общем случае требует специального отбора ТП с изначально меньшей температурной погрешностью.

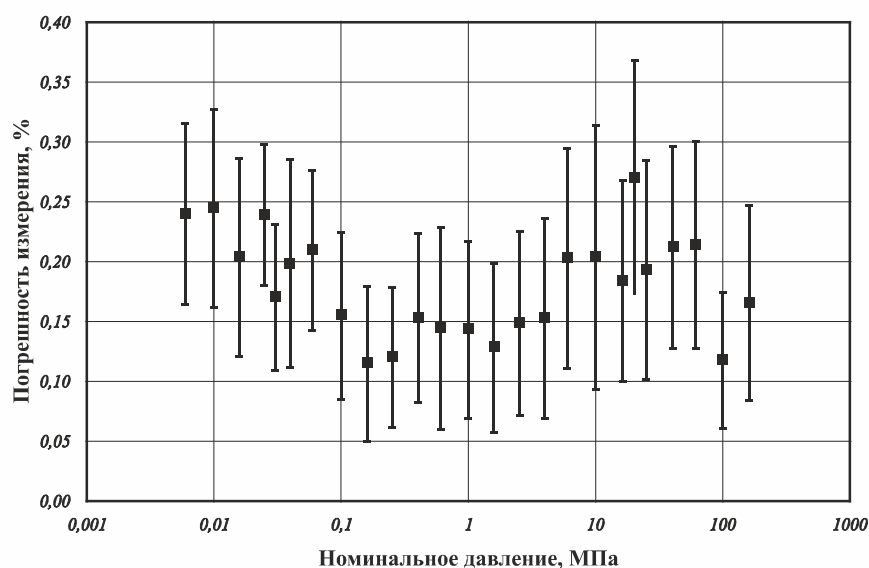


Рис. 2. Среднее значение и дисперсия погрешности измерения для датчиков МИДА-13ПК (в процентах от диапазона выходного сигнала)

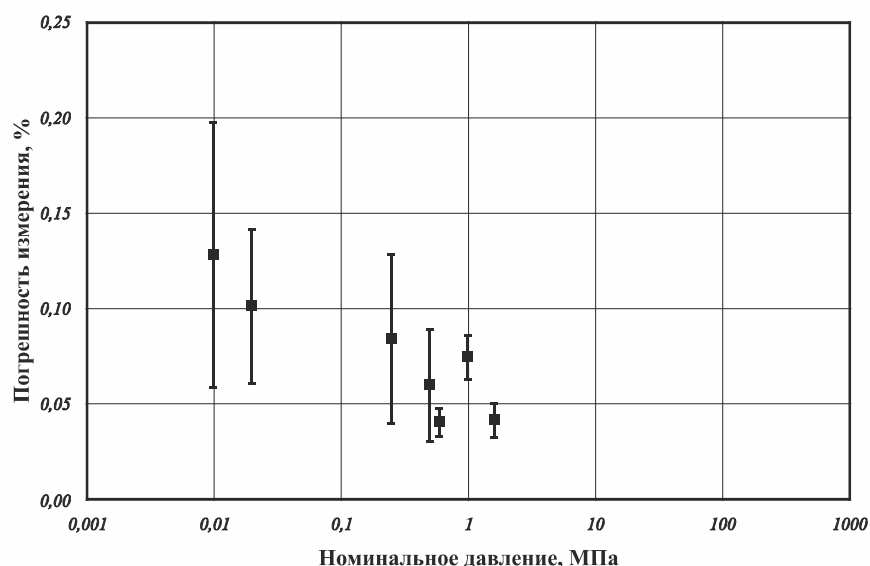


Рис. 3. Среднее значение и дисперсия погрешности измерения для датчиков МИДА-15 (в процентах от диапазона выходного сигнала)

Данных, приводимых в работах по разработке и применению цифровых методов компенсации температурной погрешности, недостаточно (в первую очередь это касается ограниченного набора температур, на которых проводятся испытания образцов датчиков) для наиболее полной оценки эффективности этих методов. Определение возможных путей улучшения цифровых методов также затруднительно в силу ограниченного набора приводимых данных.

Из выполненного обзора и анализа следует объективная необходимость дополнительного изучения температурных зависимостей начального выходного сигнала и чувствительности ТП для более полной оценки эффективности применения цифровых методов. Данные, полученные в ходе проведения измерений, могут быть использованы для разработки нового МО для температурной коррекции результатов измерений.

Во второй главе представлены результаты экспериментальной оценки эффективности применения существующих цифровых методов компенсации температурной погрешности датчиков давления с ТП на основе КНС. Для проведения исследований использовались 12 серийных датчиков избыточного давления МИДА-15 с диапазоном измерения от 0 до 1 МПа (номинальное давление $P_{ном}=1$ МПа) и рабочим диапазоном температур от -40 до +80 °С.

В ходе выполнения основной части эксперимента рассматривались девять вариантов полинома (1), характеризующиеся следующими парами степеней ($n; k$):

$$(2; 2)(2; 3)(2; 4)(3; 2)(3; 3)(3; 4)(4; 2)(4; 3)(4; 4).$$

Для степеней (2; 2) проводилась стандартная процедура индивидуальной калибровки датчиков по трем значениям температуры (-40; +30; +80 °С) с

заданием трех значений давления ($0 \cdot P_{ном}$; $0,5 \cdot P_{ном}$; $1,0 \cdot P_{ном}$) на каждой температуре. Для остальных пар калибровка выполнялась по пяти значениям температуры (-40; -20; +30; +50; +80 °C) с заданием пяти значений давления ($0 \cdot P_{ном}$; $0,25 \cdot P_{ном}$; $0,5 \cdot P_{ном}$; $0,75 \cdot P_{ном}$; $1,0 \cdot P_{ном}$). Калибровочные коэффициенты во всех случаях рассчитывались по МНК.

Все последующие испытания датчиков выполнялись на девяти температурах (-40, -30, -20, +30, +40, +50, +60, +70, +80 °C) с заданием пяти значений давления ($0 \cdot P_{ном}$; $0,25 \cdot P_{ном}$; $0,5 \cdot P_{ном}$; $0,75 \cdot P_{ном}$; $1,0 \cdot P_{ном}$) по прямому и обратному ходу на каждой температуре. При проведении измерений с датчиков считывались значения N_P , N_T и P_c .

На основе полученных данных для каждого датчика оценивались:

1. Приведенная погрешность измерения давления, выраженная в процентах от диапазона измерения.
2. Форма зависимости начального выходного сигнала и диапазона ТП от температуры. Для оценки зависимостей использовались значения N_P и N_T . Данный выбор был обусловлен тем, что значения N_P и N_T прямо пропорциональны $U_{вых}$ и R_m ТП, но в отличие от последних, непосредственно используются для расчета давления в датчике.
3. Приведенная погрешность нелинейности нагрузочной характеристики на каждой температуре, выраженная в процентах от диапазона измерения.
4. Поведение составляющих формулы (1) с $n=k=2$ при изменении температуры.

Дополнительно к этому оценивалось отклонение фактических значений N_P и N_T от теоретических, рассчитанных на основе результатов первых испытаний ТП, с целью определения возможности использования результатов первых испытаний ТП при калибровке датчиков.

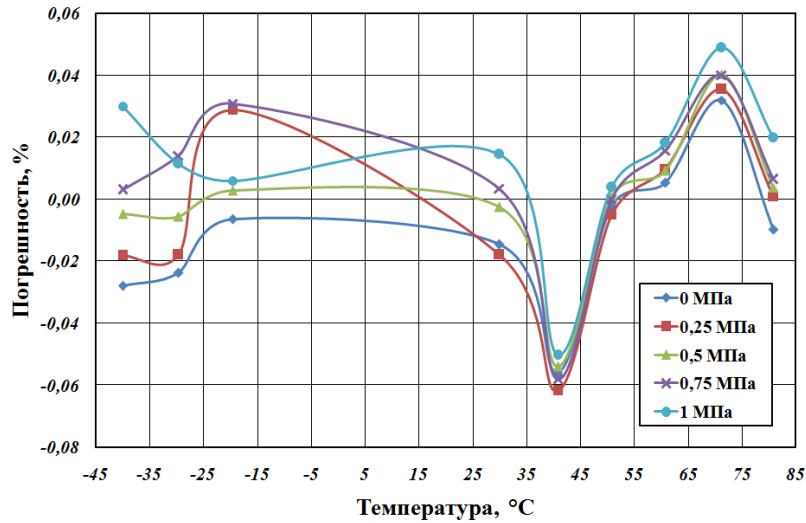
Полученные результаты показали, что увеличение степени полинома (1) как по n , так и по k не дает ожидаемого существенного увеличения точности измерения давления. Так при повышении степени полинома с 2 до 4 с соответствующем увеличением числа измерений, проводимых при калибровке, погрешность измерения остается практически неизменной ($\pm 0,065$ %) (рис. 4).

Анализ составляющих $C_i(N_T)$ полинома (1) при его записи в виде:

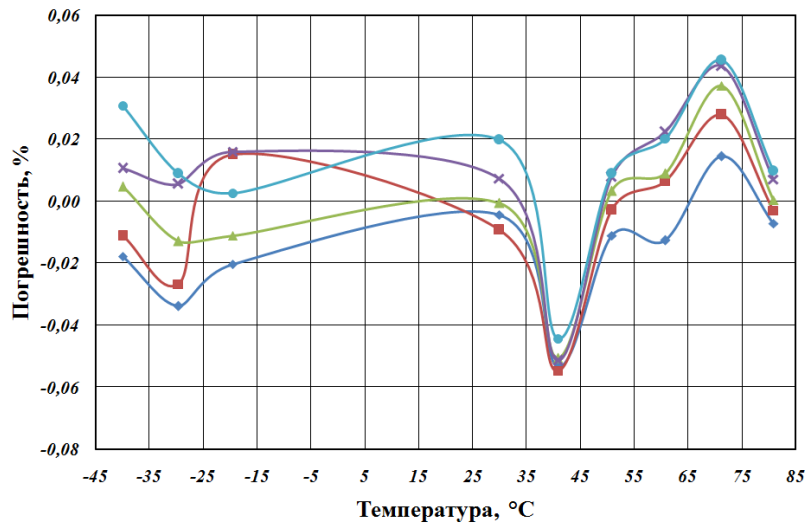
$$P_C(N_P, N_T) = \sum_{i=0}^n N_P^i \cdot C_i(N_T) \tag{2}$$

$$C_i(N_T) = f(N_T) = \sum_{j=0}^k a_{i,j} \cdot N_T^j,$$

показал, что составляющие $C_0(N_T)$ и $C_1(N_T)$ близки к параболическим, но только в случае, когда диапазон значений N_P составляет не менее половины диапазона кодов АЦП. При меньших значениях функции имеют более сложные зависимости.



а) $n=2, k=2$

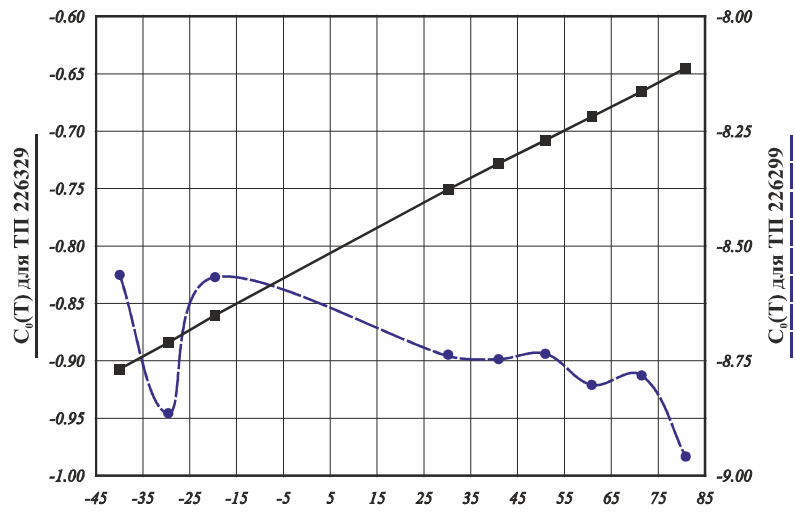


б) $n=4, k=4$

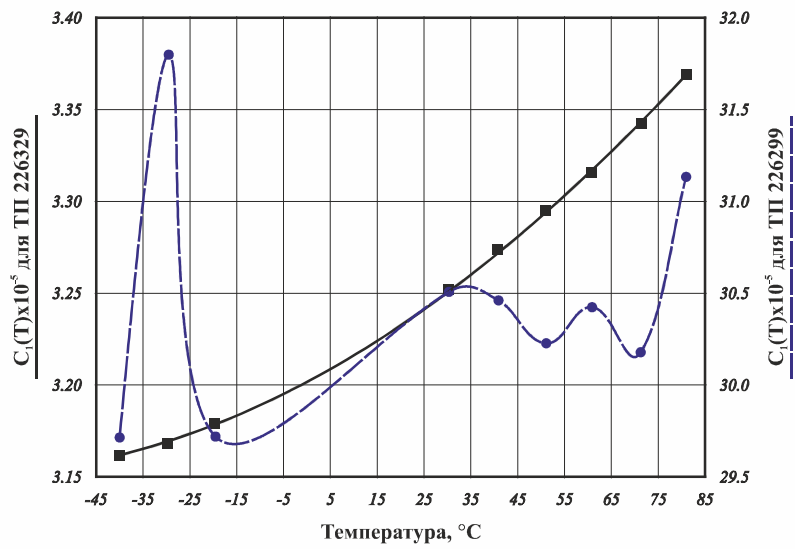
Рис. 4. Приведенная погрешность измерения давления при использовании полинома (1)

Функции $C_i(N_T)$ при $i=2\dots n$ также имеют сложные зависимости, которые могут быть описаны либо полиномами более высоких степеней, чем использовались при проведении эксперимента, либо с помощью другого математического аппарата (например, с помощью интерполяционных многочленов или сплайнов). На рис. 5 приведены примеры функций $C_i(N_T)$ при $i=0\dots 2$ для двух различных ТП.

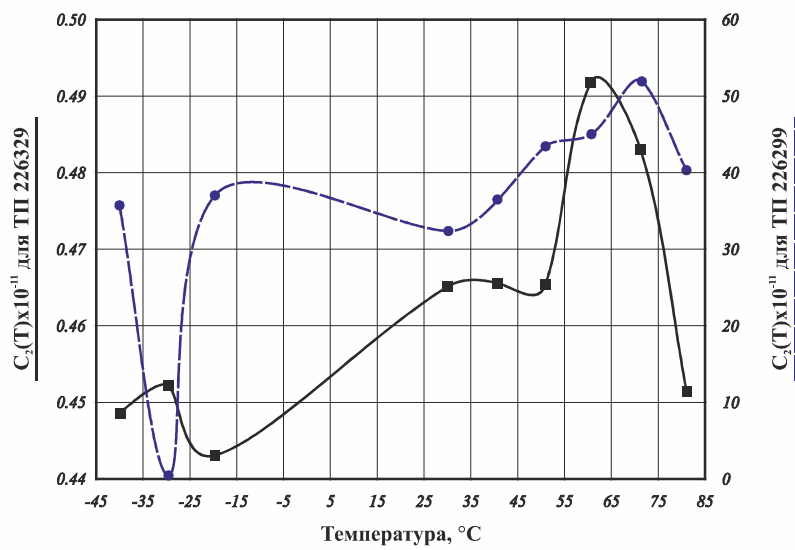
Вместе с тем, функция (1) является полиномиальной аппроксимацией обратной функции преобразования ТП и, как следствие, отдельные составляющие $C_i(N_T)$ выражения (2) не имеют явно выраженного физического смысла, что в значительной степени затрудняет анализ их влияния на отдельные составляющие температурной погрешности датчика.



а) $i=0$



б) $i=1$



в) $i=3$

Рис. 5. Графики зависимости $C_i(N_T)$ на примере 2 различных ТП

Кроме того, погрешность измерения давления при температурах близких или совпадающих с температурами калибровки значительно меньше по сравнению с другими. Это приводит к искусственному занижению погрешности измерения датчика.

Температурные зависимости начального выходного сигнала и диапазона (чувствительности) ТП, представленные в отсчетах АЦП, полностью повторяют соответствующие зависимости отдельно взятого ТП и с достаточной точностью могут быть описаны полиномом второй степени. Повышение степени полинома способствует существенному повышению точности аппроксимации указанных зависимостей, но требует соответствующего увеличения числа измерений.

Температурная зависимость нелинейности функции преобразования ТП, представленная в отсчетах АЦП, имеет сложный характер и должна быть учтена при разработке датчиков с погрешностью измерения не более 0,05 %. Основной вклад в данную зависимость вносит нелинейность измерительной схемы ВП (в частности температурная зависимость нелинейности преобразования АЦП).

Данные первых испытаний ТП могут быть использованы в качестве дополнительной информации при определении калибровочных коэффициентов. Кроме того, возможен расчет калибровочных коэффициентов датчика по результатам первых испытаний ТП с последующим получением погрешности измерения не менее 0,25 % в рабочем диапазоне температур.

Для разработки и производства датчиков с погрешностью измерения не более 0,05 % в рабочем диапазоне температур необходимо новое МО датчика, которое наиболее полно отражало бы физические особенности работы ТП. При разработке МО кроме температурных зависимостей начального выходного сигнала и диапазона (чувствительности) необходимо учесть температурную зависимость нелинейности функции преобразования ТП, которая хорошо проявляется при использовании результатов аналого-цифрового преобразования сигналов ТП. Кроме того, МО должно быть таким, чтобы процедура калибровки датчика при серийном производстве не представляла большой сложности.

В третьей главе рассмотрены пути модификации существующего МО на базе выражения (2), и разработано новое МО на базе прямой функции преобразования ТП, которая может быть записана в вид:

$$N_P(P_C, N_T) = \sum_{i=0}^n P_C^i \cdot C_i(N_T). \quad (3)$$

Искомое значение давления P_c в этом случае находится путем решения уравнения, которое получается после подстановки в (3) измеренных значений N_P и N_T . Для решения уравнения может использоваться один из численных методов (например, методом половинного деления).

Как для МО на базе (2), так и для МО на базе (3) были рассмотрены следующие варианты представления составляющих $C_i(N_T)$:

1. Аппроксимация с помощью алгебраических интерполяционных полиномов Ньютона и Лагранжа.
2. Аппроксимация по МНК с помощью системы ортогональных полиномов Чебышева и Форсайта.
3. Аппроксимация с помощью полиномиальных сплайнов (линейных, параболических и кубических).

Основными критериями при выборе и сравнении способов аппроксимации стали:

1. Точность аппроксимации исходных данных, которая напрямую связана с результирующей погрешностью измерения давления изготавливаемого датчика.
2. Минимальный объем данных, необходимый для определения параметров аппроксимирующего выражения. Значительное увеличение числа измерений в ходе калибровки датчика (более пяти значений температур и пяти значений давления на каждой температуре) при незначительном увеличении точности (уменьшение погрешности измерения на 0,01-0,02 % в рабочем диапазоне температуры) не целесообразно, т.к. ведет только к усложнению цикла производства и, как следствия, увеличению стоимости датчика при сохранении его метрологических характеристик.
3. Сложность аппроксимирующих выражений. Сильное увеличение параметров аппроксимирующего выражения и числа вычислительных операций может потребовать использования более производительного МК. Последнее приведет как к усложнению схемотехники ВП и программного обеспечения (ПО) датчика, так и к увеличению стоимости готового прибора.

Для предварительной оценки эффективности применения полученных выражений в датчике были использованы результаты измерений, проведенных ранее во второй главе. Все расчеты выполнялись в среде MathCAD. При этом для каждого варианта аппроксимации рассматривалось два варианта калибровки. В первом случае для вычисления коэффициентов использовались данные соответствующие стандартной процедуре калибровки (три значения давления: $0 \cdot P_{ном}$; $0,5 \cdot P_{ном}$; $1,0 \cdot P_{ном}$; три значения температуры -40, +30 и +80 °С). Второй случай заключался в использование максимально возможного объема данных, который можно получить в процессе калибровки. С учетом указанных ранее ограничений, это подразумевает увеличение числа температур и значений давления, на которых проводится калибровка датчиков, до пяти (пять значений давления: $0 \cdot P_{ном}$; $0,25 \cdot P_{ном}$; $0,5 \cdot P_{ном}$; $0,75 \cdot P_{ном}$; $1,0 \cdot P_{ном}$; пять значений температуры: -40, -20, +30, +60 и +80 °С). Не задействованные при аппроксимации значения N_P и N_T использовались для оценки погрешности измерения в точках, отличных от точек калибровки.

Из результатов, полученных при выполнении расчетов, следует, что повышение точности датчиков возможно только при условии увеличения числа температур, на которых проводится калибровка прибора минимум до шести. При этом применение МО на основе прямой функции преобразования ТП позволяет получить чуть более высокую точность измерения по сравнению с вариантом использования МО на основе обратной функции преобразования. Вместе с тем, МО на базе (3) требует дополнительной операции решения нелинейного уравнения с одним неизвестным для нахождения значения давления, что в свою очередь либо увеличивает время обработки сигналов ТП и формирования результатов измерения, либо требует замены, используемого в настоящее время, МК на более производительный.

Как в случае МО на базе (2), так и в случае (3) использование интерполяционных полиномов Ньютона и Лагранжа, а также МНК и ортогональных полиномов Чебышева и Форсайта дает примерно одинаковые результаты (рис. 6).

Наиболее перспективным для реализации является подход с использованием полиномиальных сплайнов, т. к. данный тип кривых позволяет наилучшим образом описать составляющие $C_i(N_T)$, $i=2,3\dots n$, которые по сравнению с $C_0(N_T)$ и $C_1(N_T)$ могут иметь более сложный характер и, как следствие, вносить наибольший вклад в результирующую погрешность измерения. Применение других методов аппроксимации возможно, но они либо требуют значительно большего объема исходных данных (например, использование систем ортогональных полиномов и расчетом их коэффициентов по минимаксному критерию), либо существенно большего числа операций для последующего вычисления значения давления (например, вариант использования полиномов Чебышева и Форсайта). Кроме того, возможна комбинация различных методов аппроксимации составляющих (2) или (3) в датчике.

Особую роль в плане повышения точности готового прибора играет выбор температур, на которых должна выполняться калибровка датчиков. Для уменьшения погрешности измерения температуры калибровки должны быть равномерно расположены в рабочем диапазоне температур прибора, иначе возникает сильный перекося зоны температурной погрешности датчика. При этом в той части, где значения температур расположены ближе друг к другу, наблюдается существенное уменьшение величины температурной погрешности.

Исходя из результатов выполненных расчетов получение датчиков с погрешностью измерения $\pm 0,05\%$ видится возможным при использовании МО как на основе прямой, так и на основе обратной функций преобразования ТП. При этом для описания составляющих $C_0(N_T)$ и $C_1(N_T)$ базовой функции могут применять алгебраические интерполяционные полиномы с расчетом их коэффициентов по МНК. Для описания составляющих $C_i(N_T)$, $i=2,3\dots n$ должны быть использованы параболические или кубические сплайны.

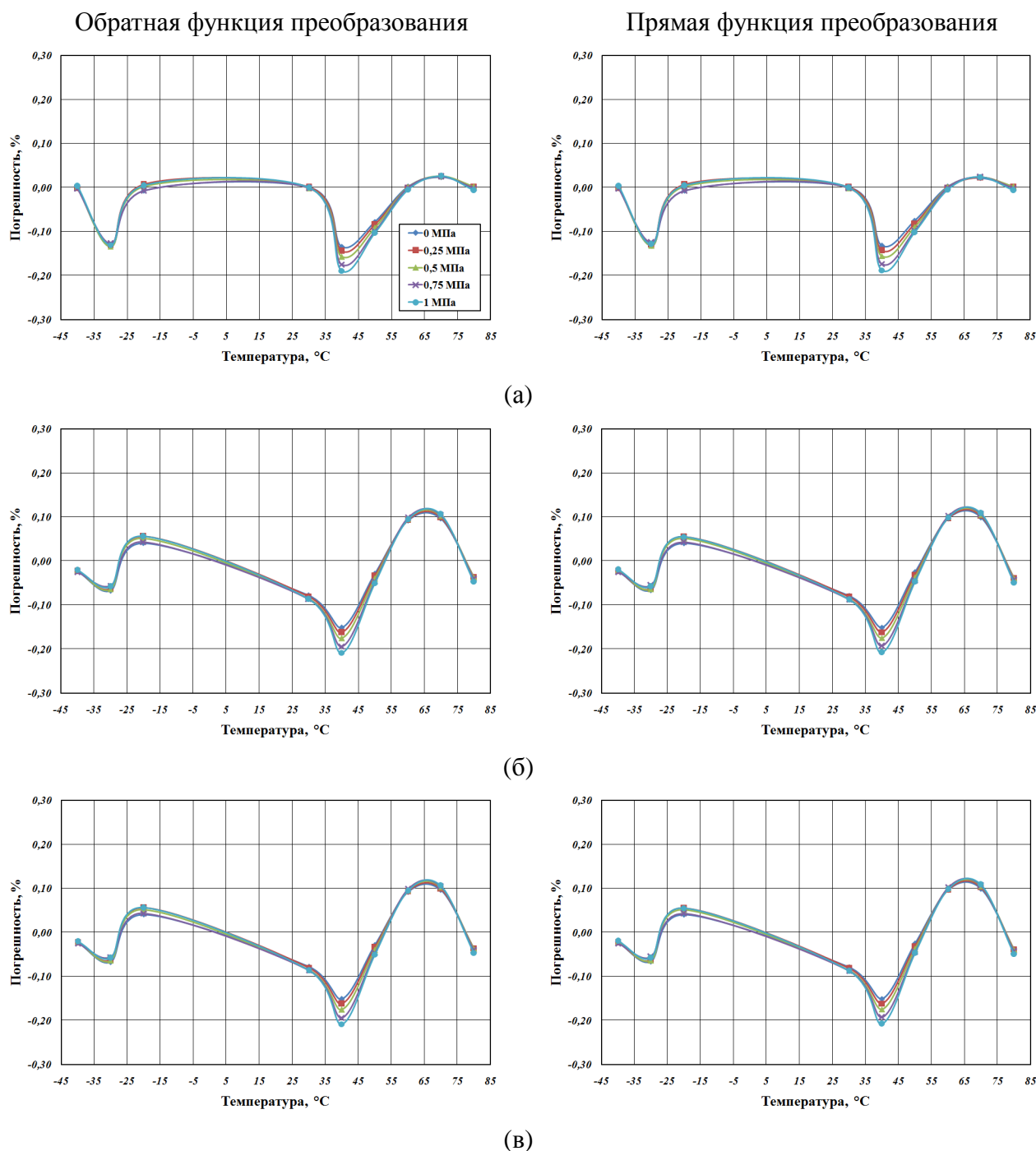


Рис. 6. Расчетная величина погрешности измерения при использовании интерполяционных полиномов Ньютона и Лагранжа (а), МНК и ортогональных полиномов Чебышева (б) и Форсайта (в) и калибровке датчика на пяти температурах

Кроме разработки МО в третьей главе была выполнена экспериментальная оценка эффективности применения цифровых методов фильтрации сигналов ТП, которая показала, что приведенная погрешность измерения давления во всем температурном диапазоне при использовании стандартного МО практически не зависит от способа фильтрации сигналов первичного измерительного преобразователя и составляет менее $\pm 0,075\%$. Погрешность, вносимая разбросом кодов АЦП, носит случайный характер и не превосходит

$\pm 0,005$ %, что пренебрежимо мало по сравнению с другими составляющими погрешности. Для построения датчиков давления с ТП на основе КНС с погрешность $0,05$ % и выше достаточно 16-разрядного АЦП при использовании любого из исследованных способов фильтрации. Применение АЦП с большей разрядностью и, как следствие, поиск дополнительных способов фильтрации шумов с практической точки зрения нецелесообразно.

В четвертой главе была выполнена экспериментальная проверка полученных ранее результатов на тех же 12 серийных датчиков избыточного давления МИДА-15 с диапазоном измерения от 0 до 1 МПа (номинальное давление $P_{ном}=1$ МПа) и рабочим диапазоном температур от -40 до $+80$ °С, что использовались ранее при экспериментальной оценки эффективности существующих цифровых методов компенсации температурной погрешности

Необходимость в такой проверки, в первую очередь, была обусловлена тем, что точность представления вещественных чисел, используемых при вычислениях, у МК ниже по сравнению с ПК, что может привести к существенному отличию теоретических и реальных результатов. Кроме того, сильное различие вычислительных возможностей ПК и МК может привести к тому, что применение разработанных методов приведет к существенному увеличению времени отклика датчика, что неприемлемо.

При проведении эксперимента проверялись следующие варианты МО датчика:

1. МО на базе (2) с аппроксимацией составляющих с помощью параболических и кубических сплайнов. Для обоих типов сплайнов проверялось три варианта калибровки: калибровка на пяти ($-40, -20, +30, +50, +80$ °С), шести ($-40, -20, +30, +50, +60, +80$ °С) и семи ($-40, -20, +30, +40, +50, +60, +80$ °С) температурах. Во всех случаях на каждой температуре на датчик подавалось пять значений давления ($0 \cdot P_{ном}; 0,25 \cdot P_{ном}; 0,5 \cdot P_{ном}; 0,75 \cdot P_{ном}; 1,0 \cdot P_{ном}$).
2. МО на базе (3) с аппроксимацией составляющих с помощью параболических и кубических сплайнов. Варианты калибровки датчика те же, что и в предыдущем случае.
3. МО на базе (2) с аппроксимацией составляющих с помощью параболических и кубических сплайнов, калибровкой на трех температурах ($-20, +30, +50$ °С) и использованием данных первых испытаний ($-40, +30, +80$ °С) ТП при выполнении расчетов. Эквивалент калибровки датчика при пяти температурах ($-40, -20, +30, +50, +80$ °С).
4. МО на базе (3) с аппроксимацией составляющих с помощью параболических и кубических сплайнов, калибровкой на трех температурах ($-20, +30, +50$ °С) и использованием данных первых испытаний ТП при выполнении расчетов. Эквивалент калибровки датчика при пяти температурах ($-40, -20, +30, +50, +80$ °С).

Для каждого варианта оценивалась приведенная погрешность измерения в каждой точке и величина зоны температурной погрешности. Примеры

получаемых погрешностей измерения при использовании прямой и обратной функций преобразования с аппроксимацией составляющих с помощью сплайнов приведены на рис. 7 и 8.

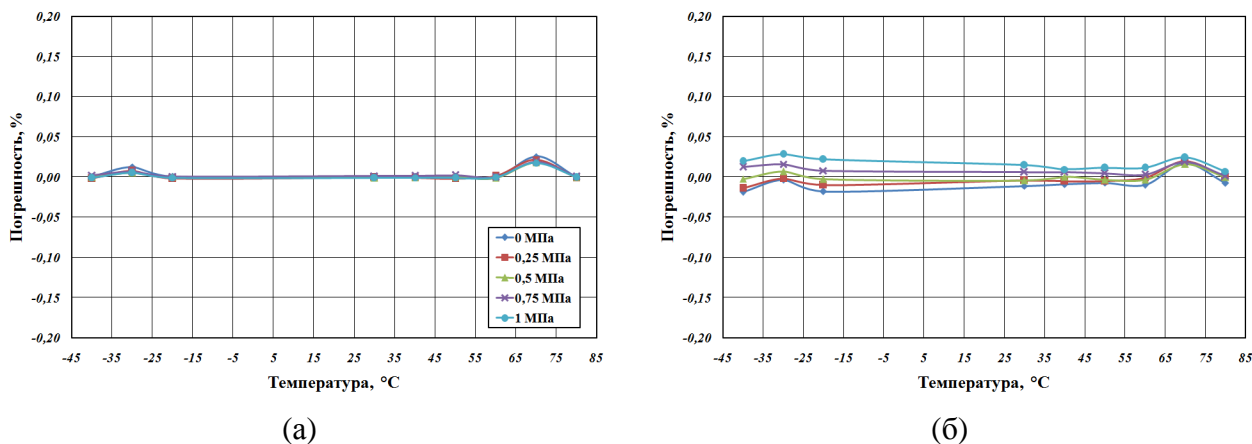


Рис. 7. Погрешность измерения при калибровке датчика на семи температурах и использовании обратной (а) и прямой (б) функций преобразования ТП

Полученные при проведении экспериментальных исследований, результаты подтвердили сделанные ранее на основе расчетов выводы о возможности изготовления датчиков с погрешностью измерения $\pm 0,05\%$ во всем рабочем диапазоне температур. Такая точность измерения достижима как при использовании разработанного МО на базе полиномиального представления обратной функции преобразования ТП с аппроксимацией составляющих с помощью сплайнов, так и МО на базе полиномиального представления прямой функции преобразования ТП с аппроксимацией составляющих с помощью сплайнов. При этом оба варианта МО дают в целом одинаковые результаты.

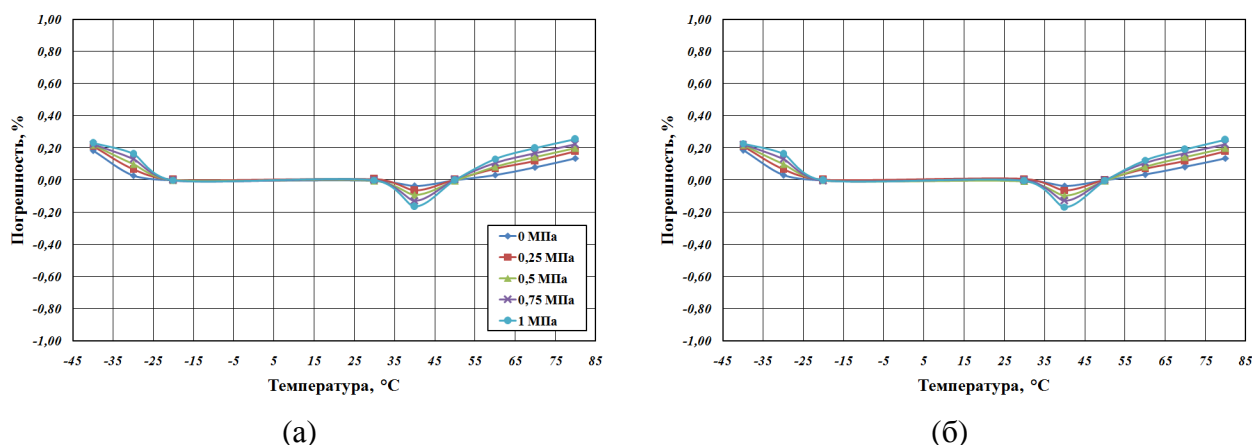


Рис. 8. Погрешность измерения при совместном использовании результатов первых испытаний ТП и калибровки и применении в датчике обратной (а) и прямой (б) функций преобразования ТП

При этом следует отметить, что получение погрешности измерения не более $\pm 0,05\%$ требует проведения калибровки на семи температурах, выбранных равномерно из рабочего диапазона температур (в ходе выполнения эксперимента использовались температуры: $-40, -20, +30, +40, +50, +60, +80$ °С, выбор которых в том числе был обусловлен техническими возможностями используемого оборудования). Уменьшение числа температур, на которых выполняется калибровка, до пяти приводит к существенному (в 5 и более раз) ухудшению точности конечного прибора.

Кроме того, из полученных результатов следует, что применение данных первых испытаний ТП для получения дополнительных значений N_P и N_T при калибровке датчиков возможно, но требует установки во ВП датчика резистора, включенного последовательно в цепь питания ТП и служащего для измерения сопротивления ИЦ ТП, с меньшим значением ТКС по сравнению с используемыми в настоящее время. Совместное использование данных первых испытаний ТП (например, на температурах $-40, +30$ и $+80$ °С) и результатов калибровки (например, на температурах $-20, +30$ и $+50$ °С) позволяет получить эквивалент калибровки прибора на большем числе температур с проведением меньшего числа измерений. Однако такой подход возможен только в случае высокой стабильности метрологических характеристик используемых ТП.

В заключении приведены основные результаты работы. В соответствии с целями и задачами представленной диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Датчики давления с ТП на основе структур КНС широко распространены на отечественном рынке датчиковой аппаратуры. Однако сильная температурная зависимость выходного сигнала ТП препятствует широкому их применению в высокоточных датчиках давления. Для уменьшения температурной погрешности ТП разработано большое количество методов, которые можно разделить на несколько групп: физико-технологические, конструктивные и схемотехнические. Схемотехнические методы дополнительно могут быть классифицированы на пассивные и активные, аналоговые и цифровые.

2. В настоящее время наибольший интерес среди всех методов компенсации температурной погрешности представляют цифровые методы, которые сформировались недавно и которые при трудоемкости, соизмеримой с традиционными схемотехническими методами, позволяют более чем вдвое повысить точность измерения. В основе всех цифровых методов лежит метод вспомогательного измерения температуры ПЧЭ с последующей коррекцией результата измерения по заранее определенным формулам. В случае ТП на основе КНС в качестве температурного элемента может использоваться сама тензосхема, сопротивление функционально связано с температурой первичного преобразователя.

3. Результаты испытаний единичных образцов датчиков давления, в которых реализован цифровой метод компенсации температурной погрешности, говорят о возможности уменьшения погрешности измерения до $0,1\%$ и ниже во

всем рабочем диапазоне температур. Однако при серийном производстве получение подобных результатов затруднительно (в среднем погрешность измерения для датчиков с цифровым выходным сигналом равна 0,076 %; для датчиков с аналоговым выходным сигналом – 0,18 %)

4. Из результатов экспериментальных исследований следует, что использование стандартного полинома (1) при $n=k=2$ позволяет получать датчики с погрешностью измерения не более 0,075 % в рабочем диапазоне температур. Повышение степени полинома с соответствующим увеличением числа измерений не приводит к существенному увеличению точности измерения, что обусловлено сложными температурными зависимостями составляющих используемого полинома, описание которых возможно либо при использовании полиномов со степенями выше 4, либо при использовании другого математического аппарата. Оценка влияния отдельных составляющих выражения (2) на результирующую погрешность измерения давления затруднена из-за отсутствия четко выраженного их физического смысла.

5. Из результатов измерений также следует, что температурные зависимости начального выходного сигнала и диапазона (чувствительности) ТП, представленные в отчетах АЦП, полностью повторяют соответствующие зависимости отдельно взятого ТП и с достаточной точностью могут быть описаны полиномом второй степени. Повышение степени полинома способствует существенному повышению точности аппроксимации указанных зависимостей, но требует соответствующего увеличения числа измерений. Температурная зависимость нелинейности функции преобразования ТП, представленная в отчетах АЦП, имеет сложный характер и должна быть учтена при разработке датчиков с погрешностью измерения не более 0,05 %. Основной вклад в данную зависимость вносит нелинейность измерительной схемы ВП.

6. Исходя из результатов выполненных расчетов следует, что повышение точности датчиков возможно только при условии увеличения числа температур, на которых проводится калибровка прибора минимум до шести. При этом применение МО на основе полиномиального представления прямой функции преобразования ТП позволяет получить чуть более высокую точностью измерения по сравнению с вариантом использования МО на основе обратной функции преобразования требует дополнительной операции решения уравнения с одним неизвестным для нахождения значения давления, что увеличивает время обработки сигналов ТП и формирования результатов измерения или требует замены, используемого в настоящее время, МК на более производительный.

7. Как в случае МО на базе обратной функции преобразования ТП, так и в случае прямой функции преобразования ТП наиболее перспективным для реализации является подход с использованием полиномиальных сплайнов, т. к. данный тип кривых позволяет наилучшим образом описать составляющие функций. Применение других методов аппроксимации возможно, но они либо требуют значительно большего объема исходных данных (например,

использование систем ортогональных полиномов и расчетом их коэффициентов по минимаксному критерию), либо существенно большего числа операций для последующего вычисления значения давления (например, вариант использования полиномов Чебышева и Форсайта). Кроме того, возможна комбинация различных методов аппроксимации составляющих базовой функции.

8. Для уменьшения погрешности измерения температуры, на которых выполняется калибровка датчика, должны быть равномерно расположены в рабочем диапазоне температур прибора, иначе возникает сильный перекося зоны температурной погрешности датчика. При этом в той части, где значения температур расположены ближе друг к другу, наблюдается существенное уменьшение величины температурной погрешности.

9. Получение датчиков с погрешностью измерения $\pm 0,05\%$ возможно при использовании МО как на основе прямой, так и на основе обратной функций преобразования ТП в случае. Для описания составляющих должны быть использованы параболические или кубические сплайны.

10. Результаты теоретических расчетов подтверждаются результатами, полученными при экспериментальных исследованиях разработанного МО на серийных образцах датчиков давления. Точность измерения в $\pm 0,05\%$ достижима как при использовании разработанного МО на базе полиномиального представления обратной функции преобразования ТП с аппроксимацией составляющих с помощью параболических и кубических сплайнов, так и МО на базе полиномиального представления прямой функции преобразования ТП с аппроксимацией составляющих с помощью параболических и кубических сплайнов. Оба варианта МО дают в целом одинаковые результаты и требуют проведения калибровки на семи температурах. Уменьшение числа температур, на которых выполняется калибровка, возможно только при совместном использовании данных калибровки и результатов первых испытаний ТП.

11. Кроме температурной коррекции результата измерения МК может быть использован для реализации цифровых методов фильтрации сигналов ТП, которые, как показали проведенные исследования, в целом дают те же результаты, что и традиционные схемотехнические решения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ

1. Васьков Ю.А., Емельянов Г.А. Влияние шума на точность измерения в интеллектуальных датчика давления на основе КНС // Датчики и системы. – 2012. – № 2 – С. 25-28.

Публикации в других изданиях

2. Высокоточные датчики давления для систем контроля и учета энергоносителей / Бушев Е.Е., Васьков Ю.А., Емельянов Г.А. и др. // «Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2009»: сб. науч. тр. XI международной научно-практической конференции. – Димитровград, 2009. – С. 172-175.
3. Васьков Ю.А., Емельянов Г.А., Козлов А.И. Цифровой метод коррекции температурной погрешности преобразователей давления на основе структур «кремний на сапфире» // Радиоэлектронная техника: межвузовский сборник научных трудов под ред. В.А. Сергеева. – Ульяновск, УлГТУ, 2009. – С. 72-79.
4. Васьков Ю.А., Емельянов Г.А. Общепромышленные датчики давления на основе КНС с цифровым выходом // «Энергоресурсосбережение. Диагностика – 2011»: сб. науч. тр. XIII международной научно-практической конференции. – Димитровград, 2011. – С. 147-150.
5. Емельянов Г.А., Киселев С.К. Применение встраиваемой микропроцессорной техники в полупроводниковых датчиках давления // Информатика и вычислительная техника: сборник научных трудов под ред. Н.Н. Войта. – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 214-220.
6. Емельянов Г.А., Киселев С.К. Самодиагностика микропроцессорных датчиков // Устройства измерения, сбора и обработки сигналов в информационно-управляющих комплексах: Тезисы докладов 1-й Всероссийской научно-практической конференции (г. Ульяновск, 6-10 сентября 2011 г.). – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 127-129.
7. Емельянов Г.А. Цифровые методы коррекции температурных погрешностей тензорезисторных преобразователей на основе структур «кремний на сапфире» // Тезисы докладов 45-й научно-технической конференции УлГТУ «Вузовская наука в современных условиях» (24-29 января 2011 года). – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – С. 151.

Емельянов Григорий Александрович

Исследование и разработка способов минимизации температурных погрешностей датчиков давления с тензопреобразователями на основе структур «кремний на сапфире»

Автореферат

Подписано в печать «10» января 2013. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 1,17

Тираж 100 экз. Заказ 17

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.