

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

УДК 681.586.72

На правах рукописи

БАЯСИЛОВА ЗУХРА АНУАРОВНА

**Разработка и исследование совмещенных датчиков давления и
температуры**

6D071600 – Приборостроение

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:
Бактыбаев М.К.,
канд. физ.-мат. наук, асс. проф.
КазНИТУ им. К.И. Сатпаева,
Республика Казахстан
Михайлов П.Г.,
докт. техн. наук, проф.
Пензенский ГТУ
Российская Федерация

Республика Казахстан
Алматы, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

| | | |
|----------|--|----|
| | НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ | 4 |
| | ОПРЕДЕЛЕНИЯ | 6 |
| | ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ | 7 |
| | ВВЕДЕНИЕ | 8 |
| 1 | СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ | 15 |
| 1.1 | Анализ применения датчиков в приборостроении и технологических системах при экстремальных условиях эксплуатации | 15 |
| 1.2 | Классификация датчиков физических величин | 21 |
| 1.3 | Обзор и анализ существующих конструкций совмещенных датчиков давления и температуры | 22 |
| 1.4 | Постановка и обоснование задачи разработки ряда совмещенных датчиков давления и температуры для приборостроения | 35 |
| 2 | ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИЛОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ | 35 |
| 2.1 | Исследование и выбор методов преобразования силовых параметров | 35 |
| 2.2 | Исследование и выбор методов преобразования тепловых параметров. | 44 |
| 2.2.1 | Измерение тепловых параметров | 44 |
| 2.2.2 | Термочувствительные элементы, особенности конструкций и характеристик | 46 |
| 2.3 | Совместимость методов преобразования в многофункциональных датчиках давления и температуры | 58 |
| 3 | РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУР СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ | 62 |
| 3.1 | Моделирование элементов и структур совмещенных датчиков давления и температуры | 62 |
| 3.2 | Исследование динамических характеристик УЭ датчиков | 66 |
| 3.3 | Исследование влияния присоединенной массы на частотные характеристики упругих элементов | 71 |
| 3.4 | Исследование метрологических характеристик УЭ измерительных преобразователей | 76 |
| 3.5 | Разработка аналитических и численных моделей элементов ИП | 80 |
| 3.6 | Учет и моделирование влияния механических напряжений на характеристики ЧЭ и ИМ иДФВ | 85 |
| 3.7 | Анализ и синтез структурных моделей многозвенных измерительных преобразователей | 88 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.8 | Разработка моделей емкостных измерительных модулей и чувствительных элементов датчиков давления и температуры | 92 |
| 4 | ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ УЗЛОВ И КОМПОНЕНТОВ СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ | 98 |
| 4.1 | Разработанные конструктивно–технологические решения для МЭД давления и температуры. | 98 |
| 4.2 | Выбор и анализ материалов и комплектующих для совмещенных датчиков давления и температуры | 100 |
| 4.3 | Метрологическое обеспечение испытания и исследования совмещенных датчиков давления и температуры | 108 |
| 4.4 | Результаты испытания и исследований элементов и узлов и совмещенных датчиков давления и температуры | 111 |
| 4.5 | Методы и средства испытания датчиков пульсаций давления | 115 |
| | ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 120 |
| | СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | 124 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ А – Фотографии ПЧЭ ДДТ | 133 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Листинг программы расчета прочностных характеристик ПЧЭ датчика ДДТ-1 | 135 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ В - Краткое технико-экономическое обоснование создания совмещенных модульных датчиков | 137 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Акт внедрения в НИР | 138 |
| | ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Акты внедрения в учебный процесс | 139 |

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:
СТ РК 2.4-2007 - Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан (ГСИ РК). Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения.

СТ РК ГОСТ Р 51318.24-2009 ГСИ РК - Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость оборудования информационных технологий к электромагнитным помехам. Требования и методы испытаний.

СТ РК 1.1-94 ГСИ РК - Термины и определения.

СТ РК 2.12-2013 ГСИ РК - Система калибровки средств измерений. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения.

СТ РК 2.18-2009 ГСИ РК - Методики выполнения измерений. Порядок разработки, метрологической аттестации, регистрации и применения.

СТ РК 2.21-2007 ГСИ РК - Порядок проведения испытаний и утверждения типа средств измерений.

СТ РК 2.30-2007 ГСИ РК - Порядок проведения метрологической аттестации средств измерений.

СТ РК 2.75-2009 ГСИ РК - Порядок аттестации испытательного оборудования.

СТ РК 2.41-2014 ГСИ РК - Области применения средств измерений, подлежащих поверке.

РК 2.46-2014 ГСИ РК - Программное обеспечение средств измерений. Общие положения. Порядок аттестации.

СТ РК 1782-2008 - Электромагнитная совместимость технических средств. Термины и определения.

СТ РК 2.135-2007 ГСИ РК - Совместимость технических средств электромагнитная. Испытания на помехоустойчивость. Виды испытаний.

СТ РК 2.136-2007 ГСИ РК - Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств.

СТ РК 2.229-2012 ГСИ РК - Калибраторы давления. Методика поверки.

СТ РК ИЕС 62026-1-2013 - Устройства распределительные комплектные низковольтные. Интерфейсы между контроллерами и приборами (CDI). Часть 1. Общие правила.

СТ РК МЭК 60079-0-2010 - Среды взрывоопасные. Часть 0. Оборудование. Общие требования.

СТ РК МЭК 60079-11-2010 - Среды взрывоопасные. Часть 11. Защита оборудования средством обеспечения искробезопасности.

ГОСТ 2.052-2006 ЕСКД - Электронная модель изделия. Общие положения.

ГОСТ Р 51086-97 - Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения.

ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ - Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

ГОСТ 16263-70 - Метрология. Термины и определения.

ГОСТ 8.009-84 ГСИ - Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

ГОСТ 8.256-77 - Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения.

СН РК 4.02-03-2012 - Строительные нормы Республики Казахстан. Системы автоматизации.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применены следующие основные термины с соответствующими определениями:

Электронная модель изделия (модель) - Электронная модель детали или сборочной единицы

Датчик - Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

Преобразователь физической величины [ПФВ] - Устройство, предназначенное для восприятия и преобразования контролируемой физической величины в выходной сигнал. **Примечание:** Преобразователь физической величины имеет точностные характеристики и не относится к средствам измерения.

Электронный датчик [ЭД] - Датчик, выполненный на основе компонентов - изделий электронной техники.

Совмещенный ЭД - ЭД, предназначенный для измерения [контроля] и преобразования двух и более физических величин

Компонент ЭД - Функциональная часть ЭД, предназначенная для реализации предписанной функции.

Чувствительный элемент ЭД - Функциональная часть электронного датчика, находящаяся под непосредственным воздействием физической величины.

Преобразовательный элемент ЭД - Функциональная часть ЭД, в которой происходит одно из ряда последовательных преобразований контролируемой ФВ.

Измерительная электрическая цепь ЭД - Электрическая цепь ЭД, осуществляющая измерительное преобразование и формирование выходного сигнала, а также коррекцию отдельных составляющих систематической погрешности ЭД.

Функция преобразования ЭД - Зависимость информативного параметра выходного сигнала ЭД от информативного параметра его входного сигнала.

Микроэлектронный датчик – Датчик, изготовленный с использованием микроэлектронных технологий

Метрологическое обеспечение - Совокупность методик, программ, испытательного оборудования и средств измерения, необходимых и достаточных для проведения испытаний датчиков.

Физическая величина - Материальная субстанция (вещества, поля, материальные предметы), которая имеет количественные показатели, которые можно измерить.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

ВШП – встречно-штыревые преобразователи

ГСИ РК - государственная система обеспечения единства измерений

Республики Казахстан

ДД - датчик давления

ДДТ датчик давления и температуры

ДТ - датчик температуры

ДФВ - датчик физической величины

ДЧЭ – деформационно-чувствительный элемент

ИИС - информационно-измерительная система

ИМ – измерительный модуль

ИП – измерительный преобразователь

ММ – математическая модель

МН – механическое напряжение

МЭД - микроэлектронный датчик

МЭМС - микроэлектромеханическая система

ПАВ – поверхностно-акустическая волна

ПИМ – полупроводниковый измерительный модуль

ПО – программное обеспечение

ПР – пьезорезистор

ПЧЭ – полупроводниковый чувствительный элемент

ПЭ ДПД – пьезоэлектрический датчик пульсаций давления

САПР - система автоматизированного проектирования

СДДТ – совмещенный датчик давления и температуры

СИ – средство измерения

СЭ – сенсорный элемент

ТКЛР - температурный коэффициент линейного расширения

ТР – терморезистор

ТС – термосопротивление

ТЧЭ – термочувствительный элемент

УЭ – упругий элемент

ФВ - физическая величина

ФММ – физико-математическая модель

ФЧХ - фазо-частотная характеристика

ФЭЯ – физический эффект и явление

ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь

ЧЭ - чувствительный элемент

ЭД - электронный датчик

ЭФХ – электрофизическая характеристика

ВВЕДЕНИЕ

Оценка современного состояния решаемой научно-технологической проблемы (задачи)

Характерной чертой мирового развития информационных и управляющих систем является все более широкое применение во всех сферах жизнедеятельности датчиков разнообразных физических величин, в основном неэлектрических. Датчики физических величин (ДФВ) применяются в промышленном контроле, в автоматизации производственных процессов, в автомобильном, авиационном и железнодорожном транспорте, авиационной технике и атомной энергетике. Особенно велика их роль при измерениях ФВ в экстремальных условиях эксплуатации: ударные нагрузки, радиация, вибрации, температура.

ДФВ становятся основными элементами, определяющими технический уровень и стоимость информационных и управляющих систем. При этом, помимо высоких метрологических характеристик, ДФВ должны обладать высокой степенью надежности, долговечностью, стабильностью, малыми габаритами, массой и энергопотреблением.

Следует отметить, что современные промышленные информационные системы имеют пирамидальную многоуровневую структуру, при этом информация о состоянии и функционировании объекта передается от нижнего уровня к верхнему [1].

Датчики и исполнительные устройства с помощью цифровых (RS485, 1-Wire, CAN) и аналоговых интерфейсов (0-5В, 4-20мА, 0-16мА, 0-24мА) подключаются к промышленным контроллерам или специальным устройствам передачи данных, изготовленных для конкретного типа датчика [2, 3].

Особенностью этого уровня, является его повышенная информативность и разнообразие средств измерения и различие в видах сигналов по амплитуде, типу (аналоговый, цифровой, электрический, неэлектрический), по частотному диапазону и проч.

Как правило, большинство ДФВ воспринимает одну величину, например, давление, перемещение, температуру, при этом точки съема у ДФВ разные, что затрудняет обеспечить построение единой модели объекта.

В тоже время, практика измерений в приборостроении показывает, что из всех измеряемых параметров в технике, промышленности и технологиях, является давление (30–40) % и температура (10-20) % всех измерений.

Кроме того, температура часто является лишь косвенным параметром, применяемым при основных измерениях других параметров. Так, при измерениях расхода газа и жидкостей измерение температуры является обязательным, так как на ее величину вносится поправка. При некоторых методах измерения именно температура является основной контролируемой величиной: тепловые расходомеры, термокatalитические газовые ячейки, датчики влажности и проч.

Таким образом, на долю совокупного измерения давления и температуры приходится порядка 45-55 % измерений ФВ, поэтому создание измерительных преобразователей (ИП), одновременно измеряющих давление и температуру в экстремальных условиях эксплуатации, является очень актуальной темой.

Данной тематикой занимаются в основном зарубежные фирмы и научные коллективы и ученые, включая такие как Эндэвко, Кулайт (США), Мида, Метран, Сигнал (Россия). К сожалению, в Казахстане нет собственного производства датчиков, поэтому используют только импортные.

В области разработки и моделирования измерительных преобразователей необходимо отметить таких российских ученых, внесших значительный вклад в данное направление, как Панича А.Е, Стучебникова В.М., Распопова В.Я., Михайлова П.Г, а также иностранных Eller E.E., Jaffe H., Jackson R.G., Fraden J., Kurtz A.D. и ряда других.

В целом, разработка конструкций и технологий производства микроэлектронных совмещенных ДДТ, работоспособных в экстремальных условиях эксплуатации являются чрезвычайно важными задачами отечественных приборостроителей. Также, не менее важной задачей для приборостроительной отрасли, является создание таких технологий и конструкций ДДТ, при которых производство ДДТ может быть освоено на малых предприятиях Казахстана с использованием блочно-модульного принципа. А это означает, что получаемые по кооперации конструктивно и функционально законченные блоки (ЧЭ, ИМ и электронные преобразователи) объединяются в единый датчик, тестируются, проходят калибровку по давлению и температуре и поставляются на внутренний и внешний рынки по ценам, которые гораздо ниже, чем зарубежные. Такие разработки соответствуют тем задачам, которые поставлены в известном Послании Президента Республики Казахстан Н.А. Назарбаева народу Казахстана «Стратегия «Казахстан-2050»: «Отечественные товары должны стать конкурентоспособными. Мы должны развивать новые производства с упором на расширение не сырьевого сектора, ориентированного на экспорт. В самых конкурентоспособных отраслях нам нужно активно разрабатывать стратегии формирования новых рыночных ниш для отечественных производителей».

В настоящей диссертационной работе впервые ставится задача совместимости измерений и на основе математического моделирования показана возможность создания совмещенных датчиков давления и температуры на основе использования МЭМС конструкций и технологий.

Основание и исходные данные для разработки темы. Правительственные программы и постановления, направленные на уменьшение зависимости от зарубежных поставок, предполагают создание в Республике Казахстан импортозамещающей продукции с высокой добавленной стоимостью, в качестве которой МЭ ДДТ. Такая тематика выдвигалась на грантовое финансирование по линии МОН РК, поэтому в настоящее время, активно разрабатывается как в научном, так и в производственном направлениях.

Как показали проведенные маркетинговые исследования, совмещенные датчики давления и температуры являются высоко востребованными в странах содружества.

Оснащение новых или модернизируемых производств в нефтехимии, нефтедобычи и трубопроводной системы импортными датчиками нецелесообразно ввиду их высокой стоимости.

В тоже время, разработка и освоение производства ДДТ, используя полный цикл разработки и изготовления всех узлов и деталей, не позволяет быть конкурентоспособными на внутреннем и внешних рынках из-за высокой стоимости и длительности изготовления. Поэтому в диссертации был принят за основу блочно-модульный принцип изготовления датчиков с использованием кооперации.

В связи с потребностью и необходимостью импортозамещения, тематика диссертационной работы является актуальной и востребованной.

Обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы. Современные АСУТП и сложные объекты мониторинга и контроля оснащаются большим количеством датчиков, измеряющих различные физические величины: давление, расход, температура, сила, деформации и проч. При этом основными измеряемыми параметрами являются давление и температура. Совмещение измерения давления и температуры одним датчиком наиболее конструктивно и технологически просто осуществить в микроэлектронных датчиках за счет формирования на одном ЧЭ термо- и тензочувствительных структур. Такое совмещение требует разработки новых конструктивно-технологических решений, которые основываются на теоретических и практических результатах, полученных в процессе проведения НИР. Необходимость проведения исследований диктуется также получением данных по устойчивости сенсорных структур и датчиков в целом к внешним факторам, имеющим экстремальный характер.

Краткое описание идеи научной работы: посредством разработки математических моделей, новых конструктивно-технологических решений, методик создается новая для Казахстана инновационная продукция: модульные совмещенные датчики давления и температуры. Тем самым, могут быть частично решены актуальные для Казахстана проблемы – импортозамещение и подключение малого бизнеса для изготовления продукции с высокой добавочной стоимостью.

Сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки, о патентных исследованиях и выводы из них определяются полнотой проведенного в литературном обзоре патентного поиска по проблеме разработки нового класса многофункциональных датчиков для сложных систем и объектов.

На основе анализа доступной информации по различным источникам рассмотрена эффективность использования новых конструктивно-технологических решений по методам совместимого измерения различных параметров. В диссертации приведены результаты научного анализа

современного состояния научно-технической проблемы и литературных исследований по прогнозированию дальнейшего направления научных разработок в области приборостроения.

Сведения о метрологическом обеспечении диссертации. Исследования метрологических характеристик экспериментальных образцов совмещенных датчиков давления и температуры проводились с использованием современного сертифицированного испытательного оборудования и цифровых измерительных приборов. Для каждого вида испытаний разрабатывалась методика испытаний, основанная на утвержденной программе испытаний аналогичных датчиков, собирался испытательный стенд, оснащенный испытательной установкой и электроизмерительными приборами.

Изготовление и испытания экспериментальных образцов совмещенных датчиков давления и температуры осуществлялись на производственных площадках ООО «Научно-производственный центр» «Контрольные измерительные технологии» (ООО «НПЦ «КИТ») г. Пенза, Россия.

В процессе испытаний использовалось профессиональное сертифицированное испытательное оборудование: вибростенд TIRA; манометр образцовый МП-60; климатическая камера Tabai-МС71; манометр грузопоршневой МП-600.

Исходными приборами для исследования служили экспериментальные образцы датчиков ДДТ-1.

Результаты, полученные в работе, основываются на известных теоретических предпосылках и подкреплены результатами моделирования с использованием современных программных продуктов, а также экспериментальных исследований технических характеристик экспериментальных образцов.

Актуальность темы. В связи с расширением сфер применения ДФВ, возникла необходимость создания ряда совмещенных датчиков давления и температуры, устойчивых к воздействию экстремальных внешних факторов (ВФ), в частности, температуры, агрессивной среды, вибраций и ускорений. Такие ВФ характерны для глубоких нефтяных скважин, авиации, ракет-носителей и проч. Поэтому при разработке необходимо учитывать воздействие ВФ на чувствительные структуры ДДТ, которые проявляются в снижении надежности, прочности, увеличении погрешности за счет генерации механических и тепловых деформаций в узлах и элементах датчиков, которые очень трудно измерить и учесть.

Следует отметить, что в настоящее время наиболее перспективными становятся микроэлектронные многофункциональные ДФВ, которые позволяют проводить одновременное измерение нескольких ФВ в одной точке, например, давление и температуру, температуру и влажность, давление и вибрации и проч. При этом модели и конструкции их являются распределенными многомерными структурами, которые очень сложно моделировать.

В связи со сложностью, трудоемкостью и дороговизной процессов разработки и изготовления ДФВ, особую роль в процессе их проектирования

приобретают методы математического моделирования, применение которых позволяют существенно сократить сроки и затраты на разработку датчиков.

В ходе проведенного исследования выявлено, что существуют разрозненные дорогостоящие программы и методики, позволяющие моделировать тепловые и деформационные поля в датчиках. К сожалению, данные лицензионные программы, основанные на конечно-разностных методах, очень дорого стоят, кроме того, они трудоемки в освоении. Поэтому традиционный инженерный подход к расчету элементов датчиков, дополненный практическими результатами, позволяет достаточно эффективно моделировать ДДТ.

В связи с этим, диссертационная работа посвящена разработке микроэлектронных совмещенных датчиков давления и температуры, рассчитанных на эксплуатацию в экстремальных условиях.

Новизна темы состоит в разработке и внедрении современных принципов математического моделирования в область компонентов совмещенных датчиков давления и температуры. В работе впервые предлагается проанализировать влияние механических и тепловых напряжений и деформаций на электрофизические характеристики сенсорных элементов.

Показана перспективность модульного подхода к конструированию датчиков, который позволяет создавать новую продукцию высокого качества с конкурентными ценами и с привлечением предприятий малого бизнеса.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Работа выполнялась как часть инициативной НИР, проводившейся между ООО «НПЦ «КИТ» и АО «ОДК - СТАР» г. Пермь по авиационной тематике.

Цели работы:

- разработка новых конструкций компонентов совмещенных ДДТ;
- создание математических моделей, алгоритмов и программ по компенсации влияния внешних факторов;
- изготовление и испытание экспериментальных макетов совмещенных ДДТ.

Объектами исследования являются совмещенные многофункциональные микроэлектронные датчики давления и температуры, предназначенные для экстремальных условий эксплуатации.

Предметом исследования является теоретический анализ и экспериментальные исследования создания и функционирования элементов ДДТ в нормальных и экстремальных условиях.

Задачи исследования, их место в выполнении научно-исследовательской работы в целом:

- провести анализ условий и режимов эксплуатации и влияния внешних дестабилизирующих факторов на характеристики ДФВ;
- исследовать и выбрать совместимые методы преобразования давления и температуры в ПЧЭ МЭД;
- разработать конструкции ЧЭ и ИМ совмещенных ДДТ;

- исследовать вопросы электрофизической, конструктивной и информационной совместимости компонентов МЭ ДДТ;
- разработать алгоритмы и программы математического моделирования структур совмещенных ДДТ;
- изготовить и испытать экспериментальные образцы ДДТ.

Поставленные задачи последовательны и логичны, определяют внутреннее единство научно-исследовательской работы в целом.

Методологическая база научных исследований

При разработке научных основ функционирования совмещенных ДДТ использованы как традиционные, так и новые формы научного исследования. К традиционным методам, в частности, относятся: анализ научно-патентной литературы, применение инженерных формул, планирование эксперимента и обработка экспериментальных данных.

Для решения вопросов разработки моделей ЧЭ и ИМ использовались методы тензорного анализа, физики твердого тела и микроэлектроники, компьютерное моделирование с привлечением традиционных известных программ Mathcad и Excel.

В целом, в научной работе развиты процедуры математического моделирования сенсорных структур и компонентов ДФВ, позволяющих обеспечить оптимизацию конструкций датчиков.

Научная новизна диссертационной работы:

- проведены исследования по анализу и выбору совместимых физических методов преобразования давления и температуры с учетом экстремальных условий эксплуатации;
- разработаны алгоритмы и программы моделирования и оптимизации УЭ и ПЧЭ;
- предложены новые конструктивно-технологические решения по оптимизации топологии и выбору совместимых функциональных материалов;
- разработаны и апробированы новые конструкции модульных ПЧЭ с деформационными и термозависимыми сенсорными элементами;
- предложена методика и разработаны модели пленочных компенсаторов.

Практическая значимость работы

Показана возможность разработки и освоения в условиях Казахстана производства новой импортозамещающей продукции: ряда микроэлектронных датчиков давления и температуры с высокой добавочной стоимостью.

Результаты диссертации внедрены в учебный процесс кафедры «Технический сервис и электроэнергетика» при проведении лекционных занятий и лабораторных работ по дисциплинам: «Метрология, стандартизация и сертификация», «Мониторинг окружающей среды» и «Датчики и контроллеры» по направлению 430301 – «Сервис» профилю «Сервис в нефтегазовом комплексе». Внедрение полученных в диссертации научных результатов позволило повысить качество и информативность учебного процесса.

Положения, выносимые на защиту

Выдвигаемые гипотезы:

- установлено влияние механических и тепловых напряжений на электрофизические характеристики ЧЭ и ИМ ДДТ и определены методы и способы компенсации.

- выявлены совместимые методы преобразования давления и температуры в одном ЧЭ.

На основе выдвинутых гипотез разработаны положения, выносимые на защиту:

- совместимые методы преобразования силовых и тепловых параметров, учитывающие экстремальные условия эксплуатации датчиков.

- математические модели ЧЭ и ИМ ДДТ, обеспечивающие возможность прогнозирования информационных и метрологических характеристик, что позволяет повысить точность измерения.

- результаты анализа влияния механических напряжений на характеристики ЧЭ и ИМ ДДТ и разработанные методы их компенсации.

- результаты исследования разработанных, изготовленных и испытанных экспериментальных образцов ДДТ, оснащенных микромеханическими ЧЭ и ИМ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 научных статей, в том числе 1 с ненулевым импакт-фактором, 4 статьи в научных изданиях, рекомендованных ККСОН МОН РК.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах кафедры «Робототехника и технические средства автоматики» КазНИТУ имени К.И.Сатпаева (Казахстан, Алматы); XII Международной научно-практической интернет-конференции «Молодежь. Наука. Инновации» (Youth.Science.Innovation) ПФ МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ) (Россия, Пенза, 2016); III Ежегодной межвузовской студенческой НПК «Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы» «ПГУ» (Россия, Пенза, 2016); Региональной молодежной научной конференции «Молодежные инициативы в науке, образовании, культуре» «Мордовский государственный педагогический институт имени М.Е. Евсевьева» (Россия, Саранск, 19-20мая 2016); XIII Mezinárodní vědecko - praktická conference «Aktuální vymoženosti vědy - 2017» (Česká republika, Praha, 22-30 června 2017); XV Mezinárodní vědecko – praktická conference «Efektivní nástroje moderních věd -2019» (Česká republika, Praha, 22-30 dubna 2019); Международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2019» (Украина, Днепр, 26-27 апреля 2019).

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованной литературы. Основной текст работы изложен на 140 страницах машинописного текста, содержит 91 рисунок, 6 таблиц, список использованных источников состоит из 128 наименований.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

1.1 Анализ применения датчиков в приборостроении и технологических системах при экстремальных условиях эксплуатации

Современные промышленные информационные системы имеют пирамидальную многоуровневую структуру. Типовая структура АСУП (автоматизированная система управления предприятием) и АСУТП (автоматизированная система управления технологическим процессом) приведена на рисунке 1.1 [1, с. 15]. Система состоит из 5 уровней. Кратко рассмотрим их с позиции программно-аппаратного оснащения. Информация передается от нижнего уровня к верхнему. С каждым новым уровнем количество информации уменьшается, а ее значимость увеличивается. Так, после диспетчерского уровня исчезает информация об уровнях сигналов с датчиков, состоянии питающих элементов датчиков и прочая вспомогательная техническая информация.

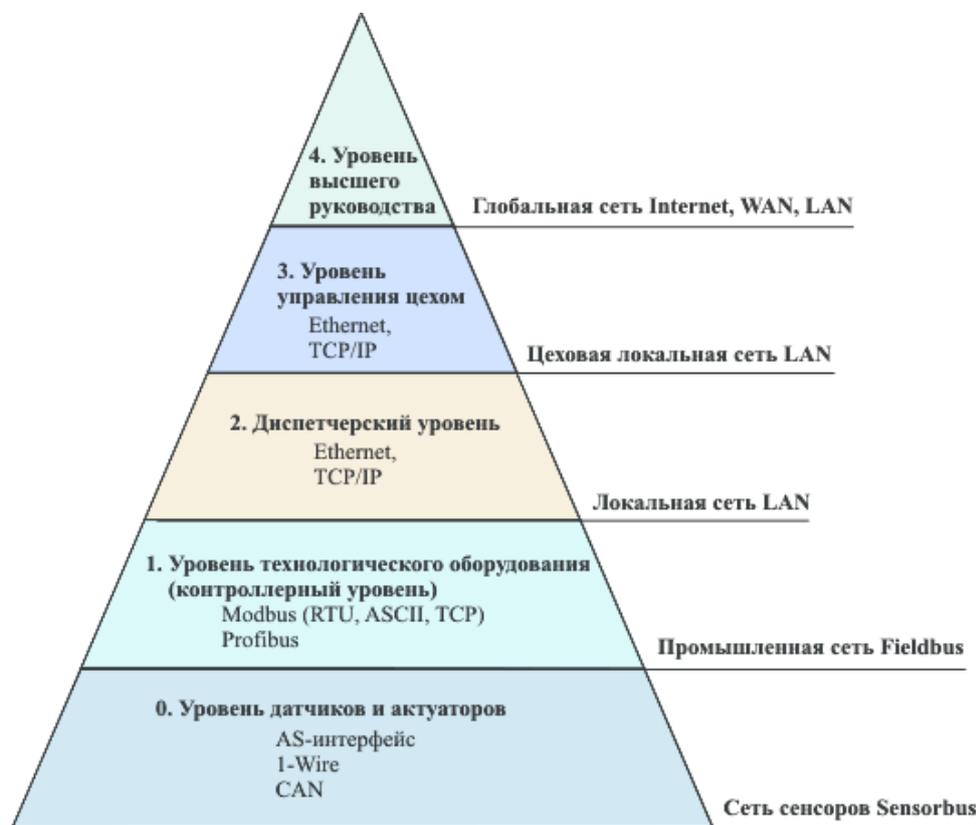


Рисунок 1.1 - Уровни иерархии современных АСУП и АСУТП

Низший (нулевой) уровень - это сети сенсоров и исполнительных устройств (актуаторов). Датчики и исполнительные устройства с помощью цифровых (RS485, I-Wire, CAN) и аналоговых интерфейсов (0-5В, 4-20мА, 0-16мА, 0-24мА) подключаются к промышленным контроллерам или

специальным устройствам передачи данных, изготовленных для конкретного типа датчика.

Первый уровень состоит из программируемых промышленных контроллеров, специализированных устройств управления и снятия показаний, изготавливаемых под определенный датчик или актуатор, модулей аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования и дискретного ввода-вывода, которые обмениваются информацией по промышленным сетям типа Modbus RTU, Modbus TCP, Profibus и др. Иногда промышленные контроллеры, служащие для ввода и вывода информации, выделяют в отдельный уровень иерархии.

Второй (диспетчерский) уровень состоит из рабочих станций, серверов с установленным программным обеспечением SCADA систем, имеющим человеко-машинный интерфейс. К таким системам относятся Siemens WinCC, Master SCADA, система «НПО МИР», Взлет СП и т.д. На данном уровне для сбора данных применяются OPC сервера. Для хранения данных применяются базы данных в основном SQL типа MSSQL и Oracle. Применение данных технологий позволяет проектировщику объединять системы различных производителей и выводить всю полученную информацию на один экран диспетчерского центра. Отказ производителя программного обеспечения от применения данных технологий влечет за собой большие проблемы совместимости. Так как большинство таких систем терпят расширение в процессе эксплуатации, то заказчику надо обязательно включать данный пункт в техзадание для разработчика.

Третий уровень появляется как средство интеграции АСУТП с АСУП. АСУП в зависимости от размеров организации может включать еще более высокий (четвертый) уровень и обеспечивать интеграцию с высшим руководством корпорации или холдинга, которое может быть расположено в различных странах. В Казахстане на большинстве предприятий и кампаний четвертого уровня нет, информация передается в виде распечатанных отчетов.

Используя эту иерархическую структуру, рассмотрим автоматизированные системы сбора показаний.

Первая - это система сбора давления DSA3000 производства Scanivalve (США), которая оборудована комбинированными датчиками давления и температуры [2, с. 7]. В этой системе было использовано несколько принципов для обеспечения стабильности полупроводниковых датчиков:

- выбор наиболее стабильных датчиков;
- индивидуальная калибровка выбранных датчиков;
- тестирование и калибровка датчиков во время работы путем установки заданной температуры и измерение ее с внесением поправок;
- тестирование и калибровка датчиков во время работы путем измерения давления на входе системы;
- сохранение результатов измерений в постоянной энергонезависимой памяти.
- использование мощного сигнального процессора DSP.

Данная система имеет следующие основные характеристики:

- погрешность датчиков не более $\pm 0,5\%$;
- частота дискретизации 625 Гц на канал;
- несколько диапазонов измерения давления;
- измерения уровня до 7,5 см, измерения давления до 50 атм;
- автокалибровка нуля.

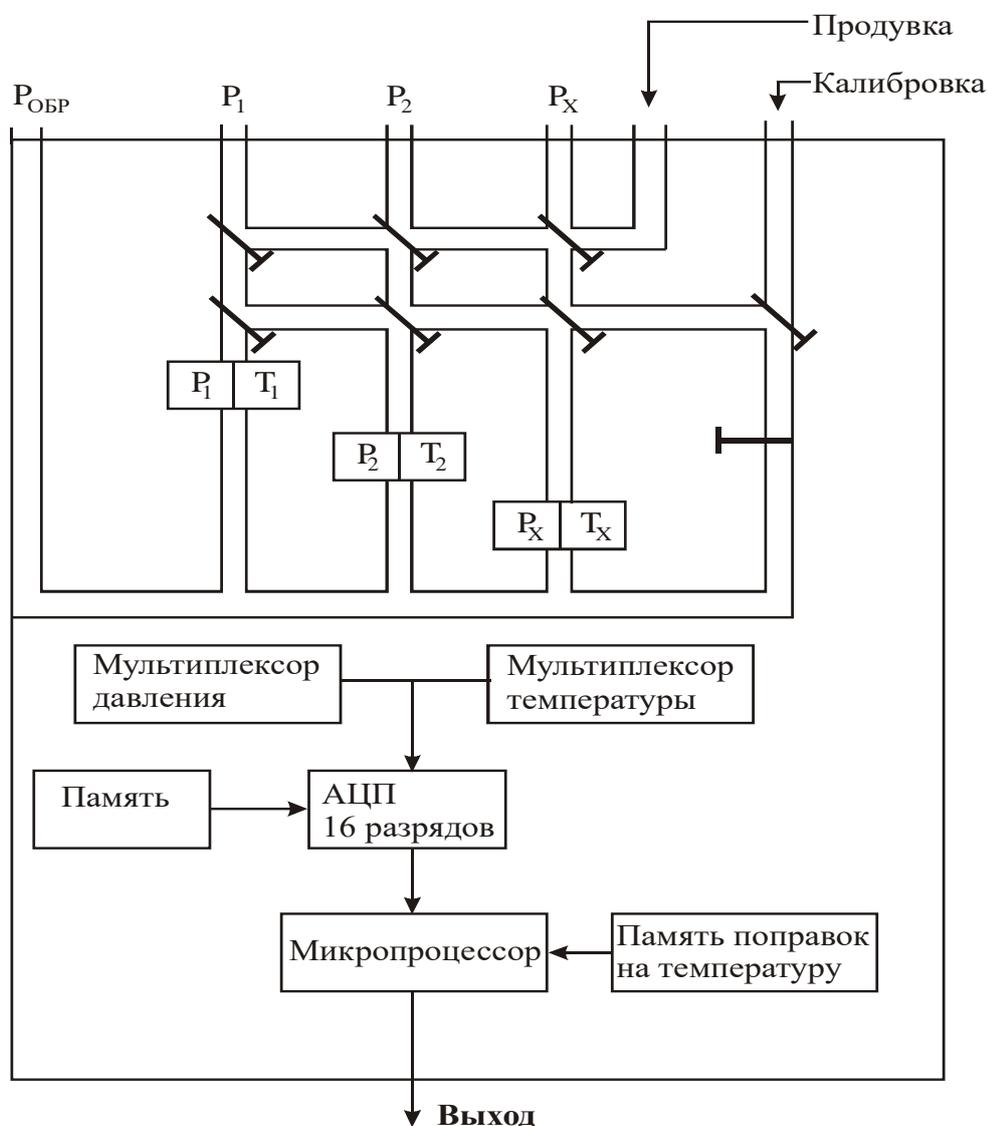


Рисунок 1.2 - Матрица цифровых сенсоров DSA3016 фирмы Scanuvalve corp. (USA): P_1 , P_2 , P_x - измерительные каналы давления, $P_{\text{ОБР}}$ - канал образцового давления

В современных системах АСУТП стараются отойти от устаревшего аналогового метода передачи информации вследствие его низкой помехозащищенности, дальности передачи, пропускной способности. Единственным уровнем, на котором используется аналоговый метод передачи информации, является самый низкий нулевой уровень. Здесь аналоговый интерфейс используется для передачи измеряемого параметра от

измерительного преобразователя до АЦП контроллера. На рисунке 1.3 приведена типовая схема современной системы автоматизации на основе ПЛК NLcon-CE [1, с. 26].

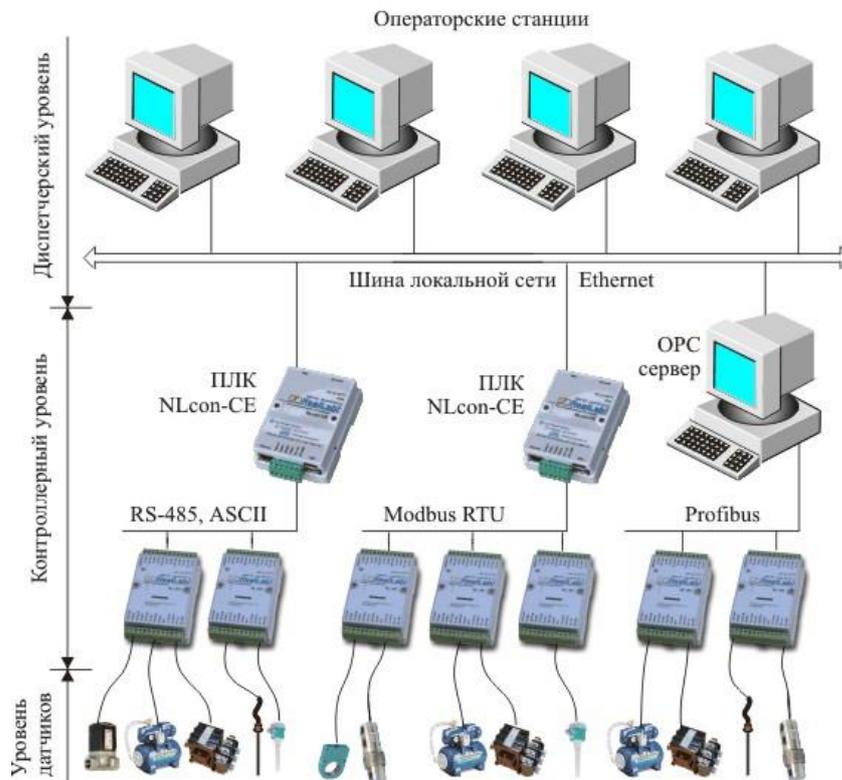


Рисунок 1.3 - Типовая современная АСУТП, включающая три уровня иерархии

Широчайшим образом датчики давления и температуры применяются в роботостроении. Типовая схема робота приведена на рисунке 1.4.

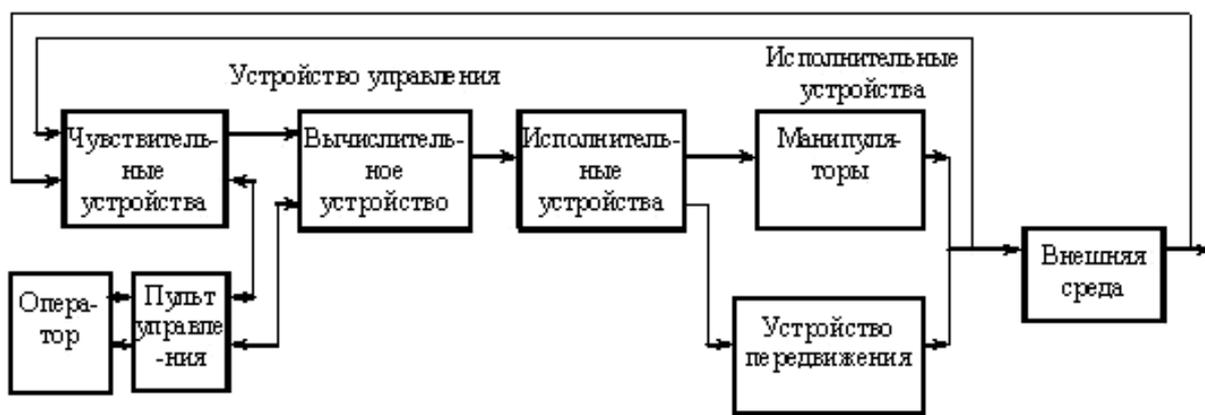


Рисунок 1.4 - Функциональная схема робота

Широкое распространение датчики давления получили в пневматических манипуляторах и пневматических ЧПУ. В нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности пневмоэлектрические преобразователи

нашли применение, обеспечивающее пожаро- и взрывобезопасность на нефтеперерабатывающих заводах, где пневматическое управление агрегатами используется во взрывоопасных зонах. Примером применения ДДТ может служить пневмопреобразователь многоканальный ППМ, производства фирмы «Круг» [3, с. 30].

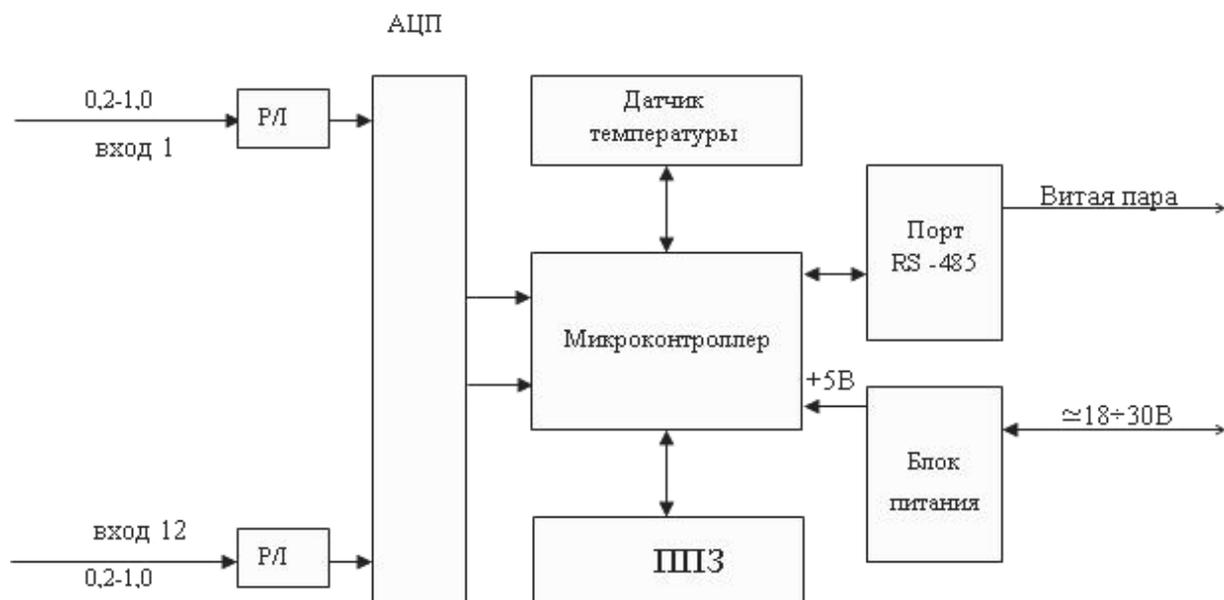
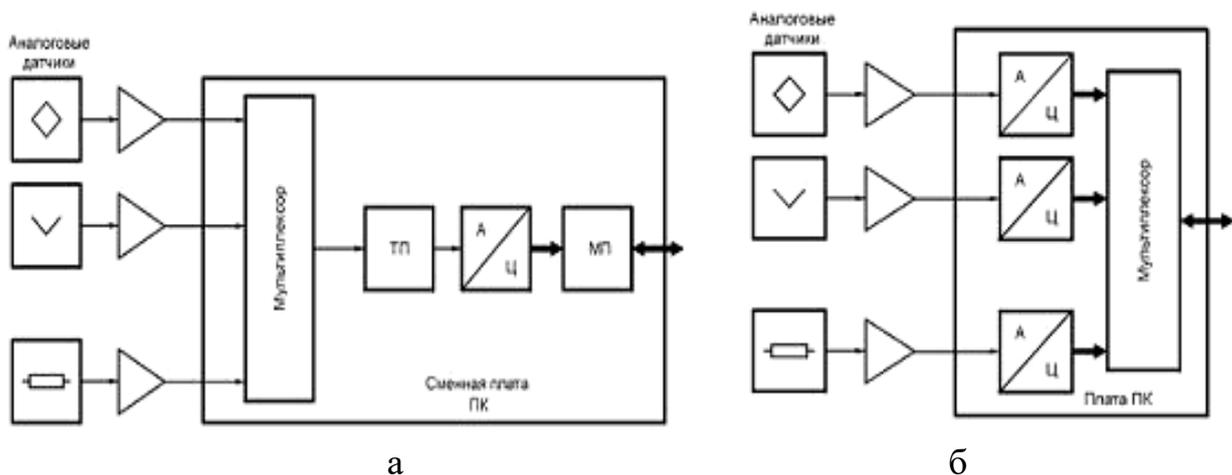


Рисунок 1.5 - Блочная схема многоканального пневмоэлектрического преобразователя

Принцип работы преобразователя. На пневматических манипуляторах установлены датчики давления, информация с них передается на 16-битное АЦП, затем в микроконтроллер. Микроконтроллер используется для температурной компенсации каждого из 12 каналов давления, а также для получения и передачи информации по RS-485. С помощью ПК через вход RS-485 в микроконтроллер записываются калибровочные коэффициенты. Для температурной компенсации используются значения температуры корпуса датчика, снятые с помощью датчика температуры. Также данная система имеет постоянное запоминающее устройство для хранения показаний и блок питания с входным напряжением (18-30) В. Система имеет гальваническую развязку, данные по RS-485 передаются с помощью витой пары. Функциональные и структурные схемы АСУТП различной сложности показаны на рисунках 1.6–1.8.



а – со сменной платой в системном блоке ПК, б – со встроенной постоянной платой

Рисунок 1.6 - Структурные схемы локальных ИИС

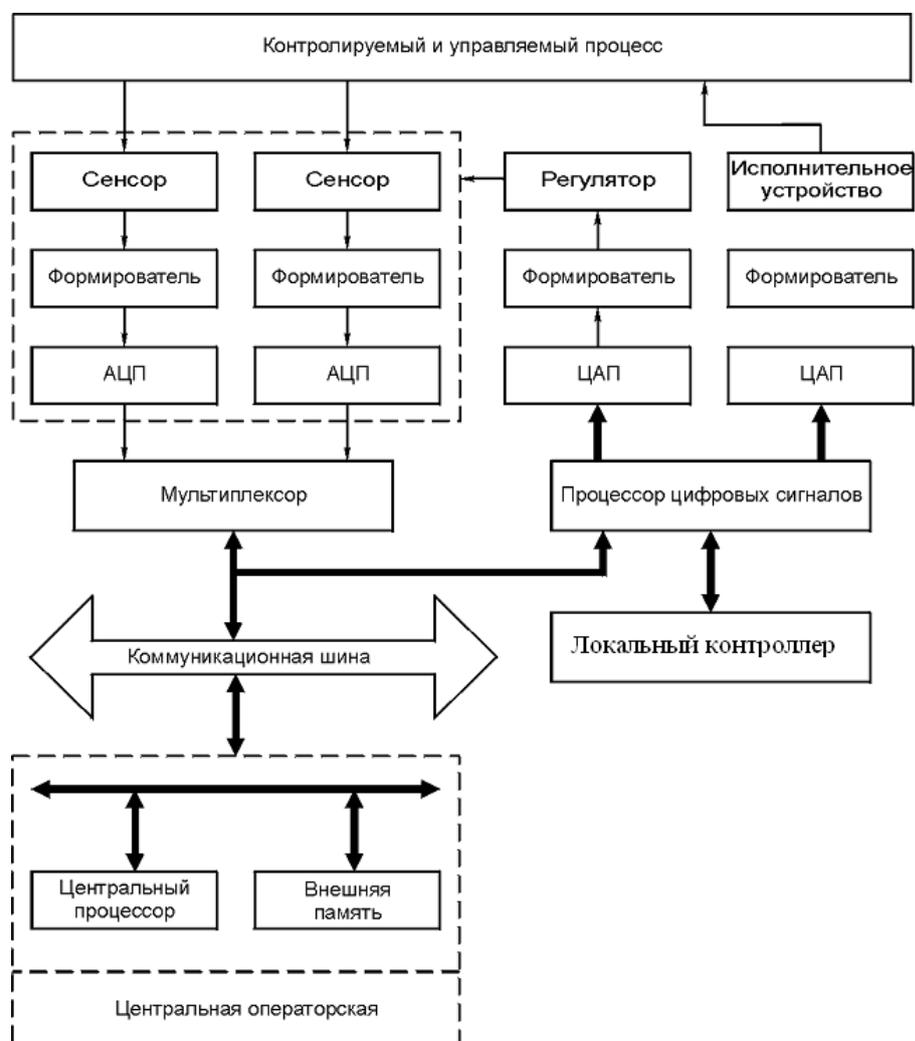


Рисунок 1.7 - Схема комплекса технических средств современной многоуровневой АСУТП

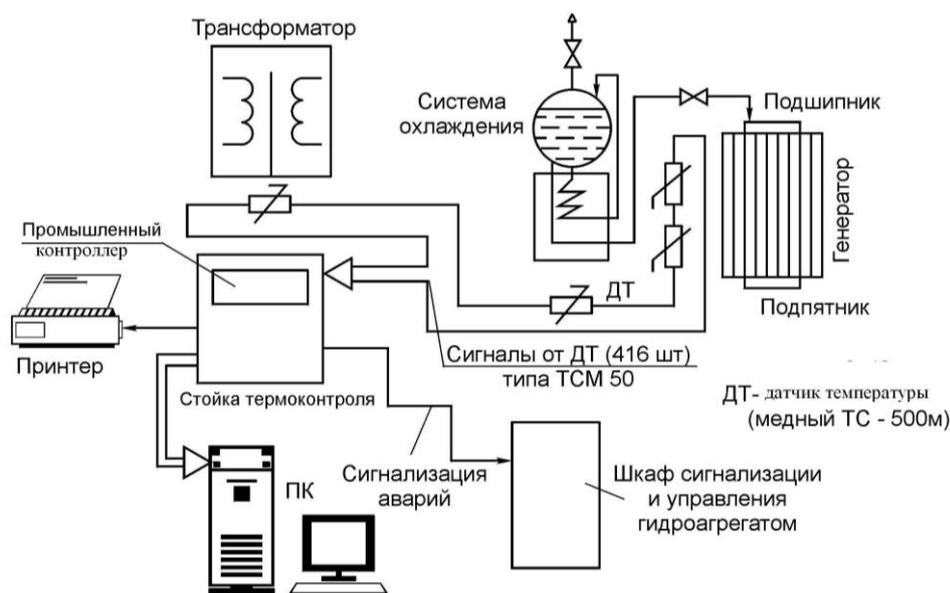


Рисунок 1.8 - Функциональная схема информационной диагностической системы теплового контроля состояния оборудования тепловой электростанции

1.2 Классификация датчиков физических величин

ДФВ могут классифицироваться по следующим критериям типы классификации: по принципу преобразования, по физическому принципу действия, по материалу чувствительного элемента, по типу воспринимаемых величин [4].

По принципу преобразования ДФВ делятся на датчики прямого, уравнивающего, интегрирующего преобразования. По физическому принципу действия ДФВ делятся на датчики емкостные, оптические, тензорезистивные, индуктивные и т.д. По материалу чувствительного элемента ДФВ делятся на датчики пьезокерамические, пьезокварцевые, металлопленочные, полупроводниковые. По типу воспринимаемых величин ДФВ делятся на датчики теплоэнергетические, движения, перемещения, химические, электрические и т.д. Классификация датчиков по конструктивно-технологическим признакам является наиболее распространенной (рисунок 1.9).

По данной классификации датчики могут быть разделены на: пьезорезистивные, термоэлектрические, пьезоэлектрические, тензорезистивные, гальваномагнитные, оптико-магнитоэлектрические, оптические, электронные, электромагнитные, акустоэлектрические, основанные на контактных явлениях, емкостные, фотоэлектрические, пневматические, гидравлические, ионизационные, дилатометрические, термохимические.

Наибольшее распространение получили следующие типы ДФВ: оптические, термоэлектрические, пьезоэлектрические, тензо- и пьезорезисторные, фотоэлектрические, емкостные, магнитоэлектрические, электромагнитные. Наиболее распространенными являются ДФВ с выходом в виде аналогового электрического сигнала. Такой сигнал наиболее легко

оцифровать для передачи на большое расстояние или преобразовать в воздействие на объект управления, например, осуществить стабилизацию оборотов электродвигателя на заданной величине.

Кроме того, достаточно распространенной для ДФВ является классификация по физическим принципам действия.

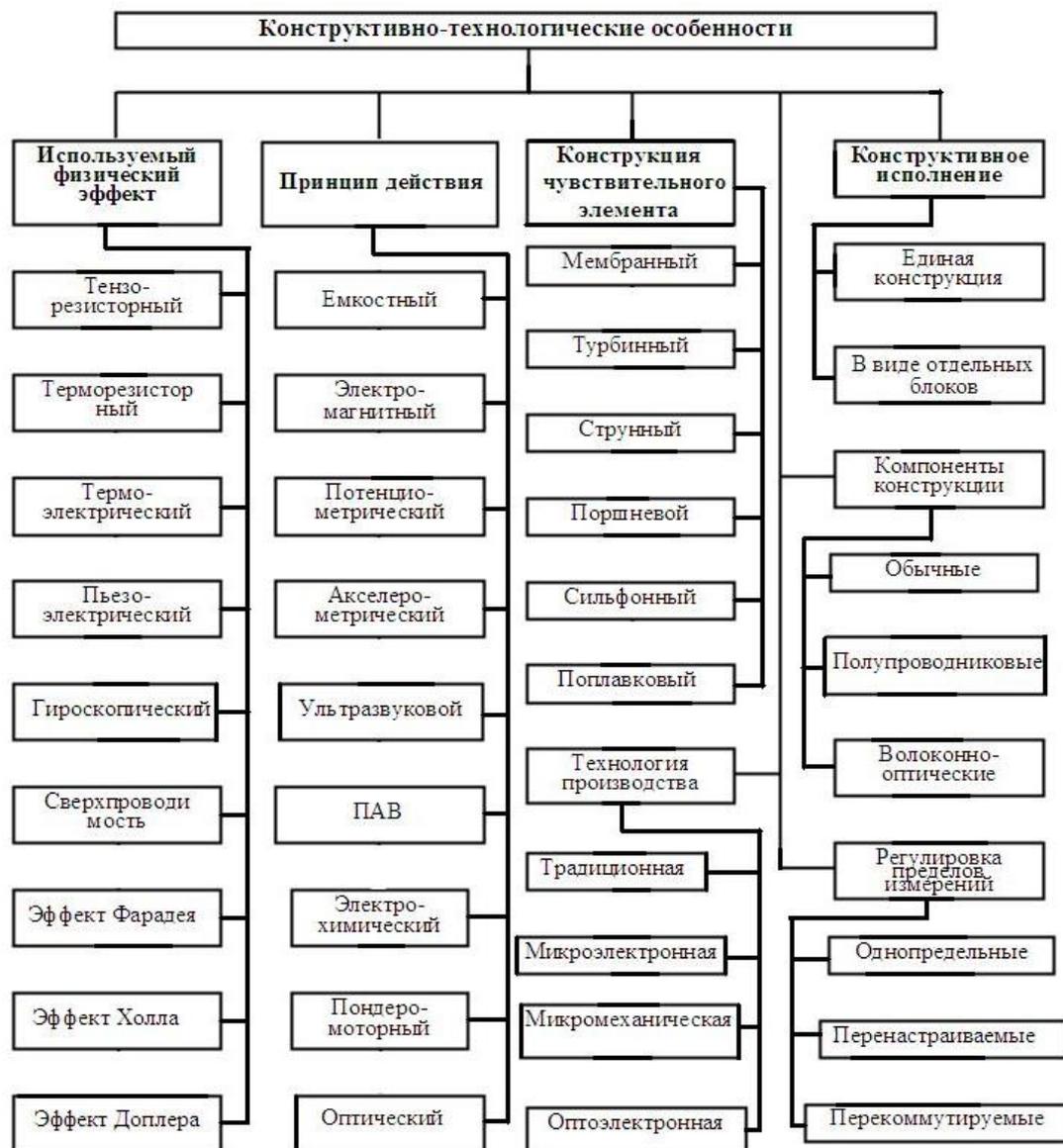


Рисунок 1.9 - Классификационная схема датчиков по конструктивно-технологическим признакам

1.3. Обзор и анализ существующих конструкций совмещенных датчиков давления и температуры

Выигрыш в габаритных размерах и улучшенные возможности компенсации измеряемых параметров – преимущества, наличие которых делает совмещенные датчики давления и температуры (СДДТ) весьма перспективным направлением приборостроения. Совмещение в одном сенсоре (датчике) измерения двух параметров, позволяет получить дополнительные качественные

характеристики, например, проводить термокомпенсацию измерения давления с повышенной точностью и уменьшать погрешность измерения в десятки раз. Кроме того, совмещение в одной точке измерения температуры и давления позволяет реализовать комплексные измерения, например, расхода жидкостей и газов, измерения пульсирующих потоков и проч. [5, 6].

Эти преимущества СДДТ по достоинству оценены разработчиками датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА). Сегодня эта область приборостроения – одна из бурно развивающихся, что подтверждается множеством публикаций по данной теме.

Существующие конструкции СДДТ основаны, прежде всего, на использовании полупроводниковой и волоконно-оптической технологий. Технология полупроводниковых датчиков и микроэлектромеханических систем является сегодня ведущей, по данной технологии производится до 80% всех датчиков в мире, поэтому наработки именно в этих направлениях используются для создания СДДТ.

Что касается оптоволоконных датчиков (ОВД) и технологий, они стали развиваться в двух направлениях, отличающихся методами модулирования светового луча: амплитудный и фазочастотный методы. При этом, амплитудные ОВД являются конструктивно более простыми, но менее точными, а фазочастотные ОВД, наоборот, схематехнически более сложные, но более точные, чем амплитудные [7]. В настоящее время, в связи с развитием оптоволоконной связи и сопутствующих ей технологий, интерес к ОВД возвращается. Примером ОВД давления и температуры может служить оптоволоконная измерительная система, в которой воздействие давления и температуры приводит к сдвигу частот (рисунок 1.10). В качестве чувствительного элемента является отрезок ОВ, на котором сформированы две брэгговские решетки с разными периодами [8, 9].

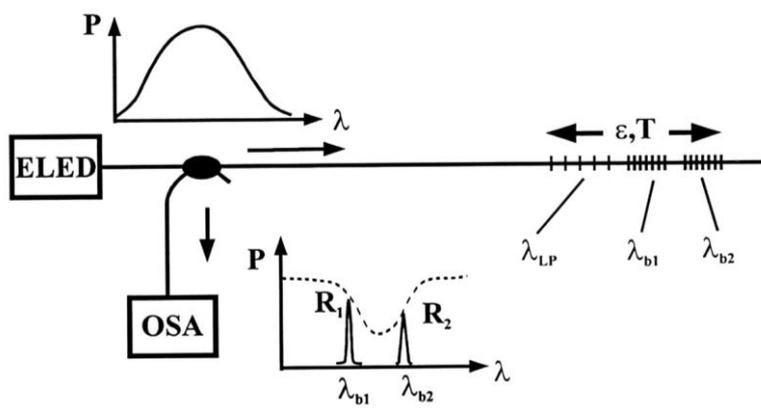


Рисунок 1.10 - Оптоволоконная измерительная система для измерения температуры и деформации на основе разнопериодных брэгговских решеток

Универсальный полупроводниковый датчик на основе транзисторной структуры описан в [10].

В схеме включения транзистора как преобразовательного элемента СДДТ в качестве чувствительного параметра используется, так называемый, плавающий потенциал на коллекторе ($U_{кб}$) при условии подключения эмиттера к генератору постоянного тока. При этом транзистор включен по схеме с общей базой (рисунок 1.11) и работает в режиме прямых токов, что является нетипичным для электронных транзисторных схем.

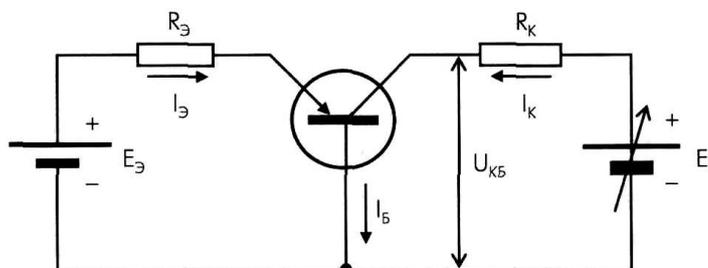


Рисунок 1.11 - Общая схема включения термотранзистора р-п-р типа в схему с общей базой в режиме прямых токов

Принципиальная электрическая схема многофункционального полупроводникового датчика приведена на рисунке 1.12, на котором показаны: источник питания $E_к$, выполненный на транзисторе Т1, при этом сопротивление резистора R_3 соответствует внутреннему сопротивлению источника $E_к$, а резистора $R_к$ - сопротивлению резистора R_4 . Генератор эмиттерного тока выполнен на транзисторе Т4.

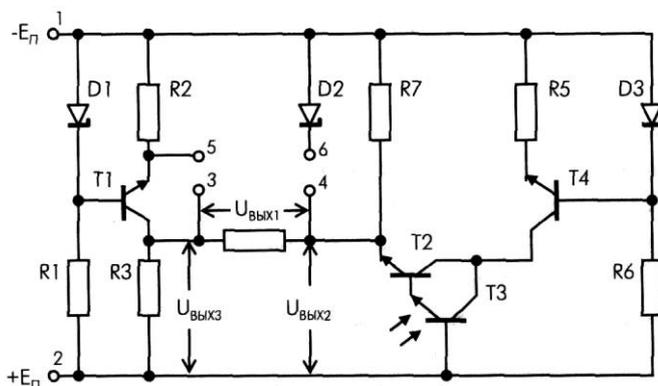
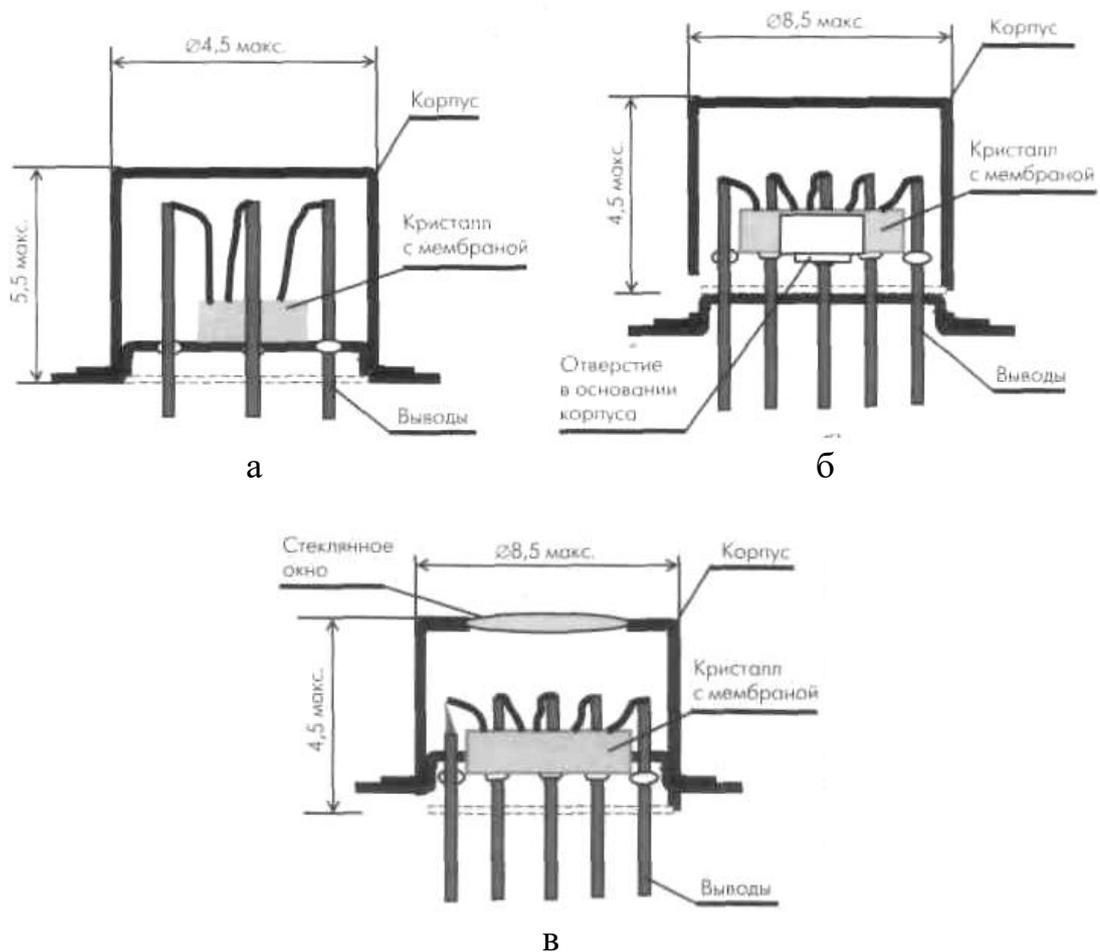


Рисунок 1.12 - Принципиальная схема многофункционального датчика

Чувствительный элемент (ЧЭ) многофункционального датчика выполнен на составном транзисторе (Т2, Т3), в котором Т3 - фототранзистор. Так как ЧЭ в схеме на рисунке 1.11 включен с общей базой и работает в режиме прямых токов через переходы, то без ущерба для его функционирования можно поменять местами эмиттерный и коллекторный выходы. Поэтому включение составного транзистора (Т2, Т3) в качестве ЧЭ позволяет не только сохранить его функциональные характеристики, но и в несколько раз повысить чувствительность датчика, так как со стороны эмиттерного промежутка

получено два последовательно соединенных р-п-перехода. И, наконец, в схему датчика введен нагревательный элемент, в качестве которого используется стабилитрон D2. Отметим важную особенность схемы датчика - она не содержит усилительных элементов, что не только упрощает схему, но и повышает стабильность ее работы и стойкость к внешним воздействующим факторам.

Интегральная схема датчика, соответствующая принципиальной схеме на рисунке 1.12, сформирована в кристалле кремния размером 1,2x1,2 мм и толщиной 0,3 мм. При одной и той же электрической схеме функциональные особенности датчика определяются конструкцией, а для датчика давления наличием мембраны в полупроводниковом кристалле. Схематические отличительные особенности конструкции датчика, связанные с его функциональным назначением, показаны на рисунке 1.13.



а) датчик температуры, б) датчик давления, в) датчик освещенности
 Рисунок 1.13 - Особенности конструкции многофункционального датчика в зависимости от его функционального назначения

Напряжение питания датчика подается на выводы 1 и 2. При изменении температуры окружающей среды в схеме датчика изменяются два напряжения - $U_{\text{вых1}}$ и $U_{\text{вых2}}$. Выходное напряжение $U_{\text{вых1}}$, снимаемое с выводов 3 и 4, имеет дифференциальный характер и предназначено для измерения абсолютного

значения температуры с применением АЦП. При использовании датчика совместно с электронными устройствами, для которых важно, чтобы обрабатываемый ими сигнал поступал к ним на вход относительно шины, являющейся общей как для датчика, так и для данных устройств, необходимо применять относительное выходное напряжение датчика $U_{\text{вых}2}$ (выводы 4 и 2). Типовая зависимость выходных напряжений датчика $U_{\text{вых}1}$ и $U_{\text{вых}2}$ от температуры окружающей среды представлена на рисунке 1.14.

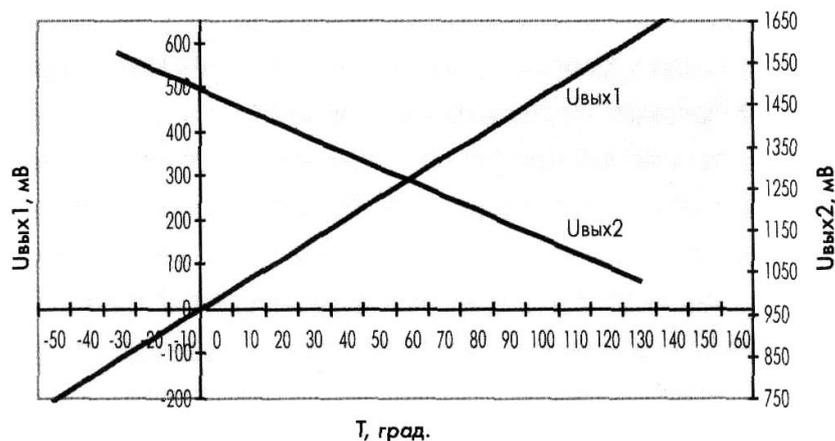


Рисунок 1.14 - Графические зависимости выходных напряжений многофункционального датчика при работе в режиме датчика температуры

При работе датчика в качестве преобразователя механического давления в электрический сигнал ЧЭ устанавливался в металлический корпус, конструкция которого приведена на рисунке 1.13, б. Это обеспечивает постоянное давление в объеме корпуса датчика, равное атмосферному, что позволяет измерять манометрическое или избыточное давление. Графическая зависимость выходного сигнала датчика от давления представлена на рисунке 1.5.

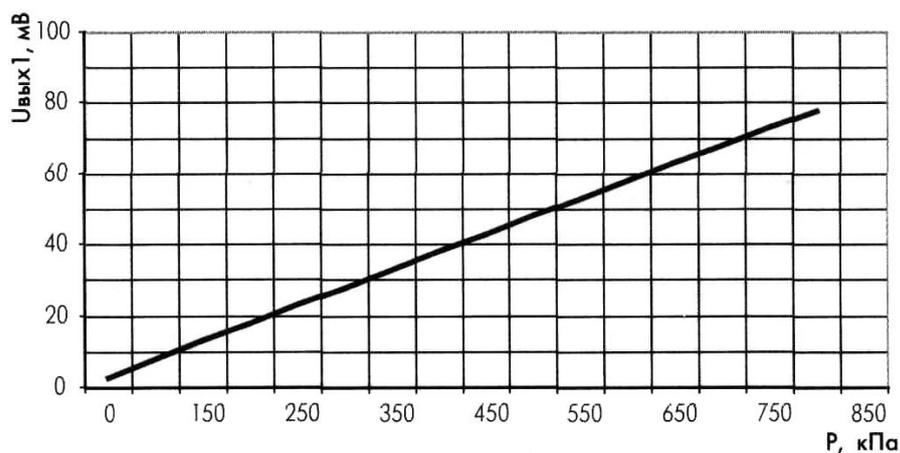


Рисунок 1.15 - Зависимость $U_{\text{вых}1}$ от давления при работе в режиме датчика давления

Типовая зависимость выходного напряжения $U_{\text{вых1}}$ от освещенности при работе в режиме фотодатчика при длине измеряемой волны 0,55 мкм представлена на рисунке 1.16.

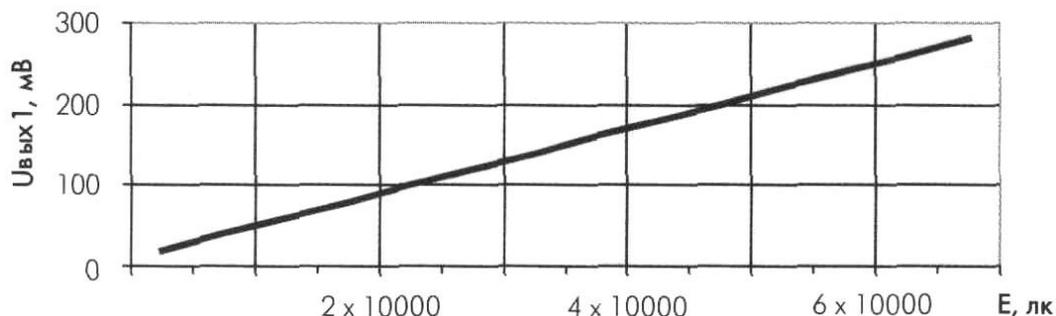
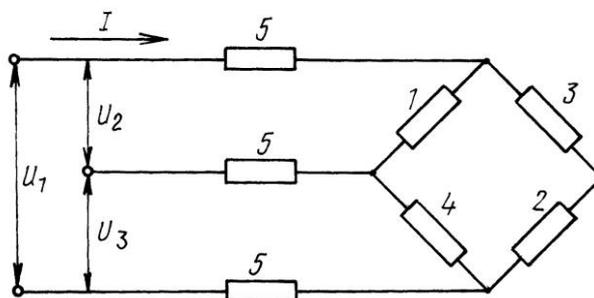


Рисунок 1.16 - Зависимость $U_{\text{вых1}}$ от освещенности при работе в режиме фотодатчика

Анализ патентной документации показал, что изобретательская активность в данном направлении науки и техники также весьма высока.

Так, в патенте № 2091578 Уфимского Государственного нефтяного технического университета [11] предлагается следующее техническое решение (рисунок 1.17).



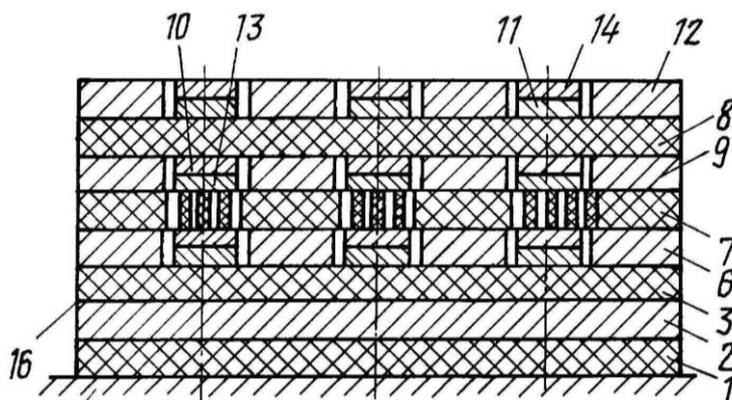
1-4 - тензорезисторы, 5 - балансировочные резисторы, U_1 - напряжение питания моста, I – ток питания, U_2 и U_3 – напряжение на плечах мостовой схемы

Рисунок 1.17 - Устройство измерения давления и температуры

Способ основан на измерении подачи тока на диагональ питания тензомоста, измерении напряжений на выводах источника тока и определении значений давления и температуры. Дополнительно измеряют напряжения на выводах источника тока, между одним питающим тензомост проводом и потенциальным и между другим питающим тензомост проводом и потенциальным, а значения давления и температуры определяют из приведенных математических соотношений. Устройство для осуществления способа содержит мостовой тензопреобразователь давления (тензомост), линию связи и источник тока. Причем выводы источника тока соединены непосредственно с двумя входами многоканального аналого-цифрового преобразователя и через питающие провода линии связи с диагональю питания

тензомоста. Одним из выводов измерительной диагонали тензомоста через третий потенциальный провод линии связи соединен с третьим входом АЦП, выход которого подключен к микропроцессорному блоку.

В Центральном аэрогидродинамическом институте им. проф. Н.Е. Жуковского представлен датчик давления и температуры на базе четырех диэлектрических пленок [12] (рисунок 1.18).

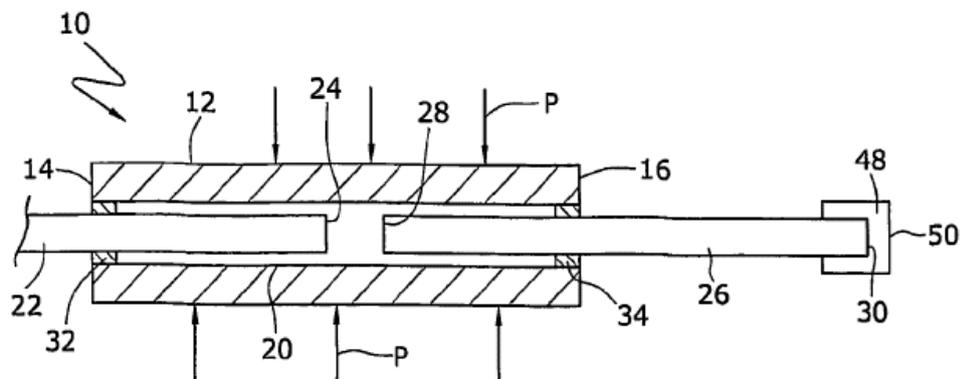


1, 3, 7, 8 – диэлектрические пленки; 2, 6, 9, 12 – проводящие пленки; 10, 11, 14 – обкладки; 13 – перфорированное отверстие; 16 - клеевая прослойка

Рисунок 1.18 - Датчик давления и температуры

На обеих поверхностях четвертой пленки и на верхней поверхности второй пленки сформированы обкладки ЧЭ давления и температуры на одной оси. В качестве материалов обкладок выбраны медь и никель. Третья пленка выполнена перфорированной. Слои между собой скрепляются клеем.

В патенте США [13] предлагается конструкция совмещенного оптоволоконного датчика давления и температуры. Изобретение представляет собой оптический датчик, состоящий из двух чувствительных участков, расположенных близко друг к другу (рисунок 1.19).



10 – излучение; 12 - наружный цилиндр; 14, 16 – торцы; 20 - внутренняя поверхность; 22, 26 – оптоволоконна; 24, 28, 30 - торцы оптоволокон; 32, 34 – уплотнения; 48 – заглушка; 50 - отражающая поверхность

Рисунок 1.19 - Оптический датчик давления и температуры

Термочувствительная область имеет коэффициент отражения, зависящий от температуры. Излучающее волокно и термочувствительный материал отделены друг от друга промежутком. Расстояние между поверхностями изменяется в зависимости от изменения давления. Первичный и вторичный отраженные лучи формируют интерферометрический сигнал, показывающий давление в области размещения оптического сенсора. Термочувствительный материал представляет собой третью отражающую поверхность, интерферометрический сигнал с которой несет информацию о температуре. Излучающий световод может быть как общим для участков измерения давления и температуры, так и отдельным для каждого участка.

Совмещенный датчик расхода, давления и температуры описывается в патенте США [14] - рисунок 1.20.

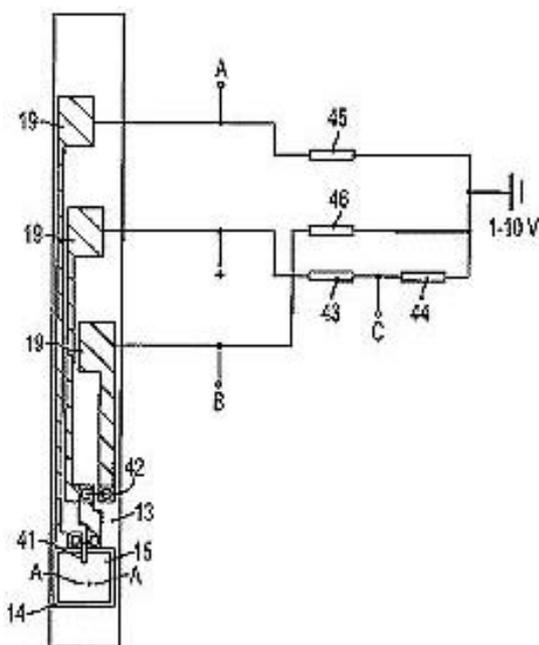


Рисунок 1.20 - Совмещенный датчик расхода, давления и температуры

ЧЭ давления смонтирован на диафрагме, которая сконструирована таким образом, что может измерять одновременно давление и скорость потока, либо массовый расход. В датчике основным элементом является малоразмерный кремниевый микрофон, который воспринимает сверхмалые вихри в турбулентном газовом потоке. ЧЭ включает в себя кремниевую подложку (13), в которой имеется вакуумированная полость (14), выполненная методом травления. Поперек полости сформирована кремниевая диафрагма толщиной 0.4-1.5 мкм и с длиной стороны в 100 мкм. На диафрагме смонтирован пьезорезистивный элемент (41). Опорный терморезистор (42) размещен на периферии полости перпендикулярно кремниевой подложке. Это обеспечивает независимость сопротивления от приложенного давления.

Резисторы объединены в двойной мост Уинстона, т.е. резисторы 42, 43, 44, 46 формируют один мост (для термокомпенсации и измерения расхода),

резисторы 41, 42, 45, 46 формируют второй мост для измерения давления. Поэтому возможно измерять температуру (в точках В и С) и давление (в точках А и С) независимо друг от друга, а значения скорости потока или объемного расхода могут быть вычислены как функция температуры. Встроенная электрическая схема выбирает сигналы давления и температуры для дальнейшей обработки. Датчик предназначен для измерения давления и потока крови через коронарные сосуды, но может также использоваться и в других областях, где требуется одновременное измерение давления, температуры и расхода.

Еще одна схема многоканальной оптоволоконной измерительной системы опубликована в журнале – рисунок 1.21 [15]. В нем ЧЭ представляет собой миниатюрный интерферометр Фабри-Перо, который связан оптоволоконным кабелем со спектрометром. Давление среды, прикладываемое к чувствительному элементу – жесткой мембране, вызывает модуляцию широкополосного оптического спектра. Температура также оказывает влияние на спектр излучения, сдвигая его по отношению к спектру давления. Сигнал спектрометра обрабатывается контроллером, в результате чего рассчитываются величины давления и температуры, вызвавшие деформацию ЧЭ – жесткой мембраны.

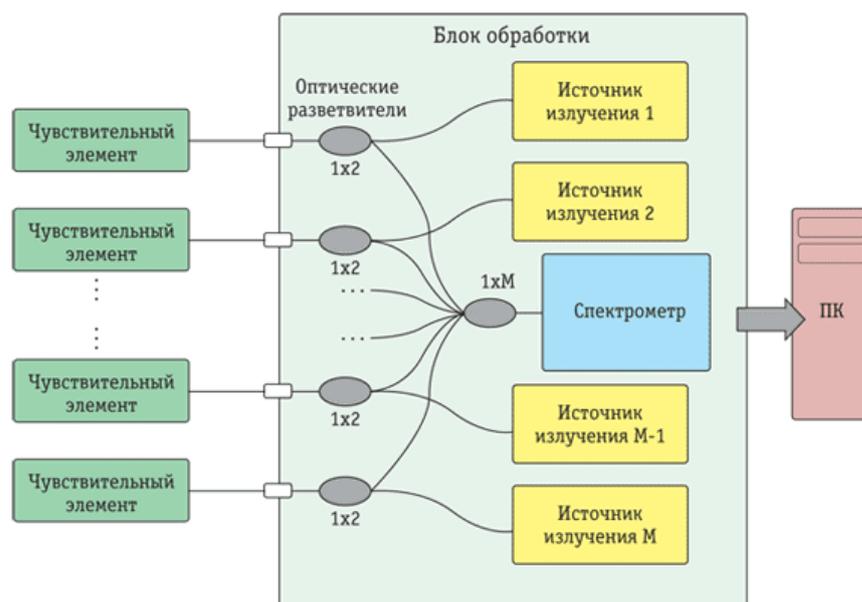


Рисунок 1.21 - Схема системы измерения давления и температуры с применением чувствительных элементов и спектрометра

В этой же статье представлена модель системы измерения с двухканальными первичными преобразователями давления и температуры – рисунок 1.22.

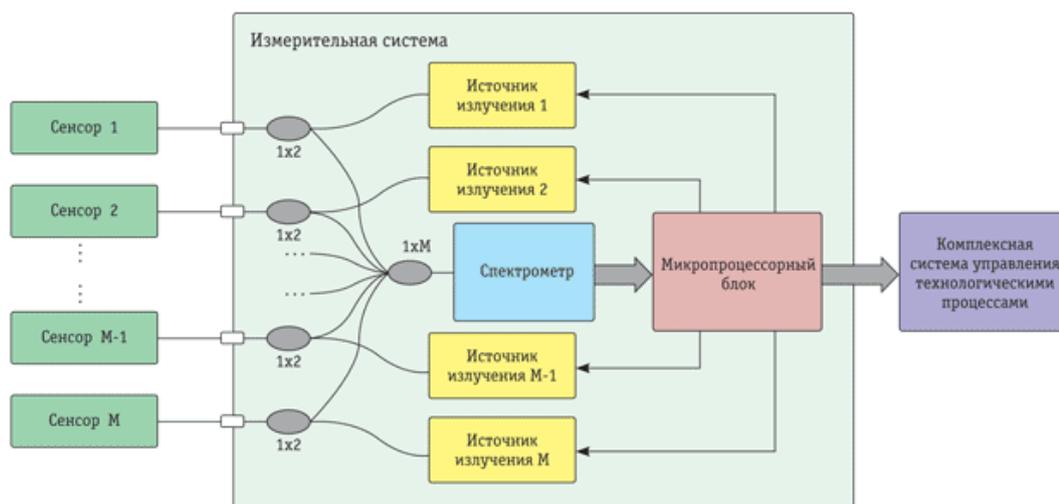


Рисунок 1.22 - Схема оптоволоконной измерительной системы с двухканальными первичными преобразователями давления и температуры

Преимуществами описанных оптоволоконных ИС контроля давления и температуры по сравнению с традиционными аналоговыми ДФВ по мнению авторов, являются:

- ИП, размещаемые в точках измерения параметров среды, не требуют электропитания. Сигнал с них может быть передан в спектрометр, удаленный на расстояние до 600 м, по одномодовому оптоволоконному кабелю.

- оптоволоконные ЧЭ и каналы связи на их основе высоко устойчивы к широкому спектру электромагнитных помех, а также являются полностью взрыво- и пожаробезопасны [16].

- высокая чувствительность самого метода интерферометрии Фабри-Перо позволяет использовать один ЧЭ практически на все диапазоны давления, при этом погрешность измерения не превышает 0,01% от верхнего предела измерения давления от 0,5 кПа до 42,0 МПа.

- в процессе измерения длина базового элемента - интерферометра Фабри-Перо, согласованно изменяется с деформацией ЧЭ – жесткой мембраны, поэтому имеющееся перед каждым измерением абсолютное значение длины базового элемента, делает первичный преобразователь независимым от воздействия аддитивных помех, «сдвигающих» ноль. При этом проблема нестабильности нуля решается автоматически.

Исследование состояния и тенденций развития конструкций совмещенных датчиков давления и температуры показал, что в настоящее время, а также в обозримом будущем, самыми перспективными будут ДФВ, изготавливаемые с применением полупроводниковых и микромеханических технологий (рисунок 1.23) [17, 18].

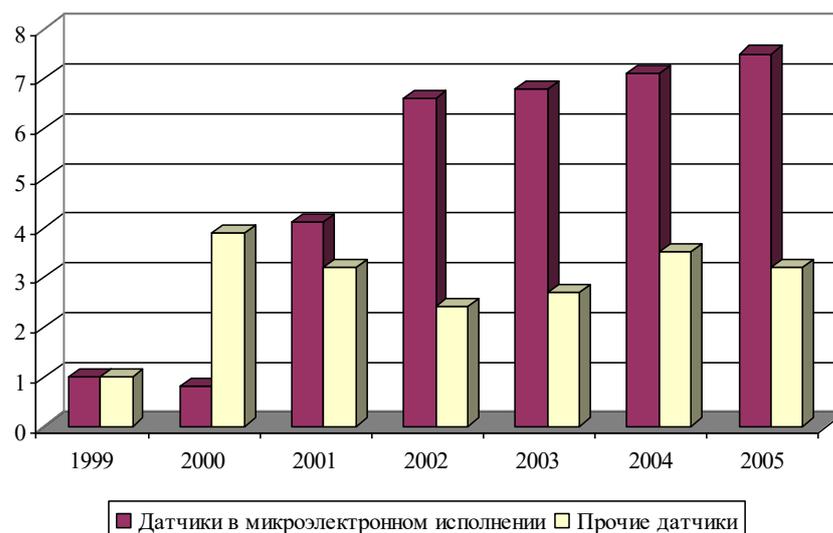
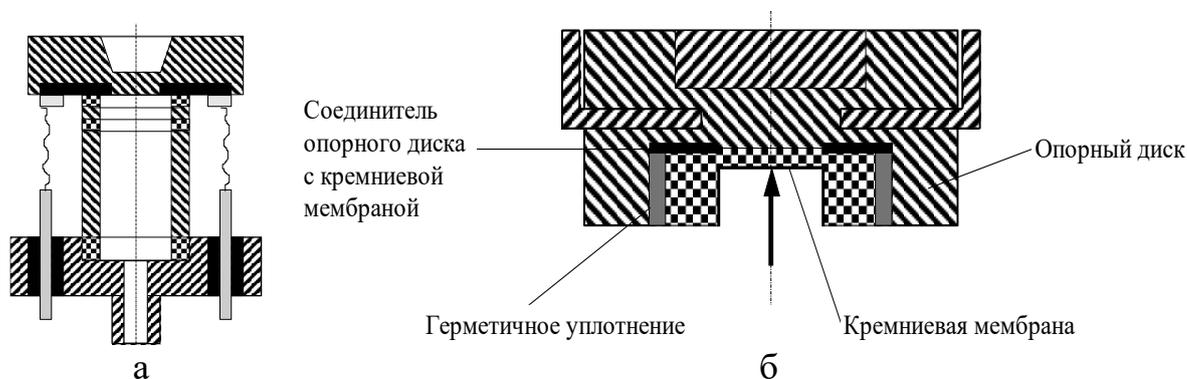


Рисунок 1.23 - Распределение совмещенных ДФВ (в %) на мировом рынке

Для наглядного представления уровня развития ДФВ в мире, приведем различные конструктивные модели микроэлектронных компонентов датчиков и сами МЭД, которые нашли применение в различных отраслях науки, техники и технологий [19, 20]. Для примера на рисунках 1.24-1.26 представлены различные конфигурации измерительных модулей совмещенных преобразователей давления и температуры.

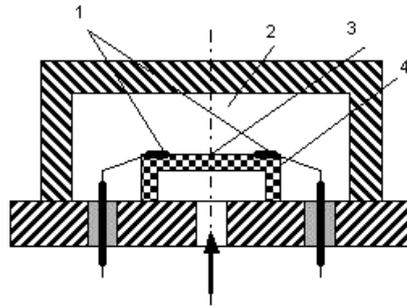


а – этажерочного типа, б - плоскостного типа

Рисунок 1.24 - Измерительные модули датчиков относительного давления и температуры на основе ПЧЭ

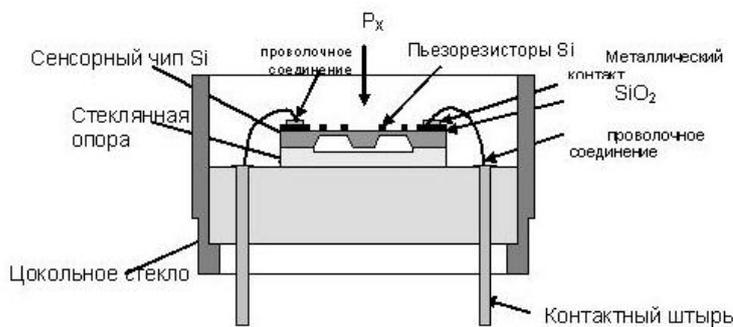
На рисунке 1.25 показан ИМ датчика абсолютного давления и температуры, который может быть использован в авиации, для контроля параметров воздушной среды в салонах пассажирских самолетов или подводных аппаратов.

А на рисунке 1.26 изображены измерительные модули фирмы Kulite: для высокотемпературного и двухканального датчиков давления [21].



1 - контактные площадки, 2 - вакуумированная полость, 3 - упругая часть мембраны, 4 - основание

Рисунок 1.25 - Вакуумированный измерительный модуль полупроводникового датчика абсолютного давления и температуры



а



б

а – высокотемпературного б – двухканального

Рисунок 1.26 - Измерительные модули датчиков фирмы Kulite

1.4. Постановка и обоснование задачи разработки ряда совмещенных датчиков давления и температуры для приборостроения

Измерения температуры и давления требуются значительно чаще, чем измерения других нефизических величин. Поэтому датчики температуры и давления чрезвычайно востребованы во всех сферах казахстанской экономики.

Наиболее востребованы, вследствие их дешевизны и гибкости, полупроводниковые датчики, основанные на тензорезистивном эффекте. Под воздействием давления изменяется сопротивление датчика. Основным недостатком данных датчиков состоит в том, что сопротивление меняется не только под воздействием давления, но и температуры. Данный недостаток устраняется путем использования схем термокомпенсации.

Обычно схема термокомпенсации представляет собой звено, расположенное последовательно звену измерения давления. Поэтому итоговая выходная характеристика датчика есть произведение характеристик звена термокомпенсации и измерения давления. Проблема состоит в том, что трудно подобрать схему термокомпенсации так, чтобы температура воздействовала на нее прямо противоположным образом во всем интервале температур и измеряемых давлений.

Задача упрощается, если мы используем совмещенный датчик температуры и давления, подключенный к микроконтроллеру. Достаточно записать зависимость давления от температуры в память микроконтроллера и проблема в основном будет решена. При этом для каждого конкретного датчика можно записывать свою индивидуальную зависимость, измеренную во время его калибровки после изготовления. В случае со схемой термокомпенсации данная процедура настолько трудоемка, что проще данный датчик заменить.

Использование в совмещенном датчике канала температуры позволяет все процедуры компенсации погрешностей и прочие дополнительные функции поручить микропроцессору или входящему в состав датчика, или расположенного вне его [22].

Применение совмещенного измерения температуры и давления удешевляет стоимость изделия, упрощает монтаж, так как монтировать один датчик проще, чем два, уменьшает общее количество датчиков на изделии.

Используя концепцию развития электронных датчиков, совмещение функций давления и температуры в одном датчике с использованием на выходе стандартных цифровых интерфейсов RS-232, RS-485 и других, хотя и увеличит стоимость самих датчиков, но приведет к появлению новых разнообразных функций [23, 24, 25]. К таким дополнительным функциям можно отнести:

- автоматизация процесса измерения;
- архивирование данных в микроконтроллере самого датчика;
- оптимизация энергопотребления датчика путем использования sleep-режимов.

Основным фактором, который в большинстве случаев перекрывает увеличение цены интеллектуального датчика, является повышение точности измерения не менее чем на порядок.

В отдельных случаях использование микропроцессоров внутри ДФВ нецелесообразно, что связано с температурными ограничениями у электронных компонентов, используемых в датчике. Их максимальная и минимальная рабочие температуры составляют от минус 40 °С до +50...60 °С. Поэтому, при использовании датчиков в более расширенном диапазоне температур, электроника располагается или на кабельной перемычке, или не используется вообще [26].

Выводы по 1 разделу

1. Определена и доказана актуальность темы диссертации.
2. При рассмотрении сфер применения совмещенных датчиков давления и температуры в приборостроении, было выявлено, что такие датчики могут быть эффективно использованы в различных сферах науки, техники и технологий Республики Казахстан.
3. Исследование тенденций и перспектив развития совмещенных датчиков показало, что наиболее перспективными являются микроэлектронные датчики.
4. Были исследованы методы преобразования и конструкции датчиков и выбраны базовые конструктивно-технологические решения.

2 ВЫБОР И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИЛОВЫХ И ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ

2.1 Исследование и выбор методов преобразования силовых параметров

Существуют всего три вида датчиков давления (ДД) для измерения абсолютного, избыточного, дифференциального давлений. Датчики абсолютного давления измеряют давления нуля (уровень абсолютного вакуума). Датчики дифференциального давления измеряют разность давлений между двумя входами. Датчики избыточного давления являются частным случаем дифференциальных датчиков и измеряют давление относительно атмосферного. Последние имеют наиболее массовое применение в жилищно-коммунальном хозяйстве.

Конструктивно ДД представляет собой чувствительный элемент (ЧЭ), расположенный между двумя камерами - в одной присутствует измеряемое давление, в другой - опорное. В датчиках абсолютного давления воздействие на ЧЭ идет только с одной стороны, дифференциального - с двух сторон, относительного, с одной стороны действует измеряемое давление, а с другой - постоянное.

Одним из мировых лидеров по производству полупроводниковых датчиков давления является компания NXP, по состоянию на 2016 год занимает четвертое место в мире по объему производства полупроводниковых изделий. Данная компания производит различные ДД в диапазоне от 0 до 10000 кПа. Рассмотрим схему датчиков MPX2100 от компании NXP (рисунки 2.1, 2.2) [27]. Данный датчик имеет 7 модификаций различного исполнения, позволяющих использовать его для измерения всех трех видов давления.

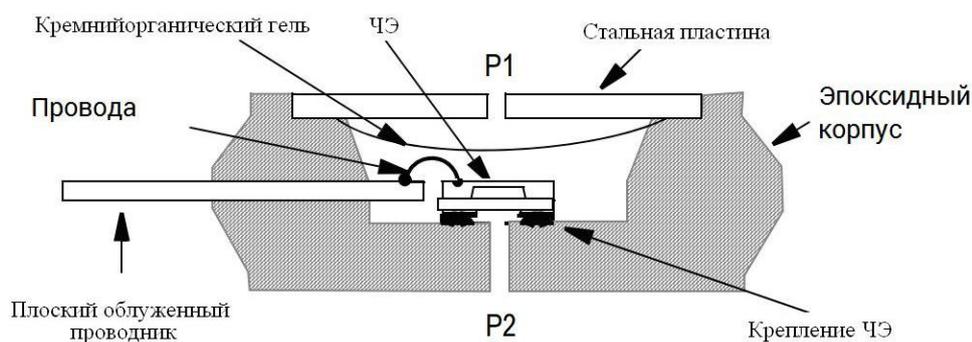


Рисунок 2.1 - Датчик абсолютного давления фирмы NXP

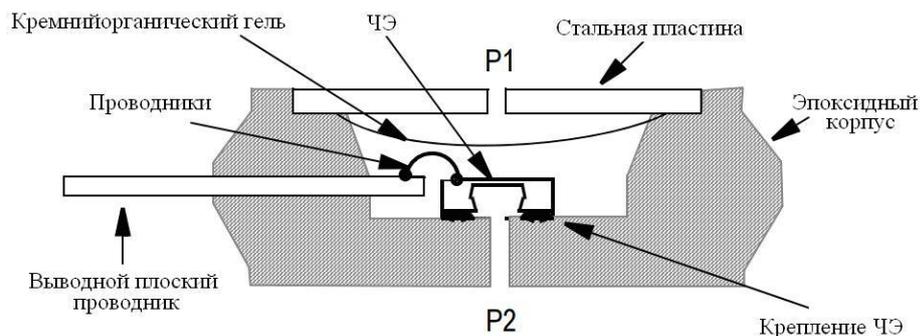


Рисунок 2.2 - Датчик избыточного (дифференциального) давления

Датчики абсолютного, избыточного и дифференциального давлений показаны на рисунках 2.1, 2.2. Как видно из них, основное отличие датчиков состоит в различии конструкций ЧЭ. Датчик избыточного, который также может измерять дифференциальное (разностное) давление рассчитан на то, что давление P_1 будет всегда больше давления P_2 , в датчике абсолютного давления к P_1 приложен вакуум. Кремнийорганический гель изолирует ЧЭ и подводящие провода от воздействия окружающей среды, при этом, не мешая действию измеряемого давления на ЧЭ. При этом производитель указывает, что датчик рассчитан на воздействие сухого воздуха, воздействие других газов или сред может привести к неработоспособности или к сокращению срока службы.

Датчик МРХ2100 использует пьезорезистивный принцип действия, при котором под воздействием давления изменяется сопротивление тензорезисторов. Недостаток такого метода - это негативное воздействие температуры, для его устранения применяются схемы термокомпенсации, в том числе и с использованием микроконтроллера.

Следует отметить, что в зависимости от скорости изменения давления, т.е. характера зависимости $p(t)$, все разнообразие задач измерения давлений можно свести к трем вариантам: измерение статических и медленноменяющихся давлений, измерение быстроменяющихся давлений и измерение импульсных давлений (рисунок 2.3) [28, 29].

На практике к группе статических принято относить давления, значение которых остается неизменным за время проведения измерений. Медленноменяющееся давление - это процесс, содержащий постоянную составляющую и гармонические составляющие с частотами до 20...30 Гц.

К быстроменяющимся и импульсным давлениям относят процессы со случайными и гармоническими составляющими в частотном диапазоне от десятков до сотен тысяч герц.

Характер изменения медленноменяющихся давлений во времени различен: $p(\tau)$ может представлять собой сложную функцию, постоянная составляющая которой аппроксимируется, например, трапецеидальным импульсом с различными временами нарастания и спада (рисунок 2.3, а).

На рисунке 2.3 приняты следующие обозначения для графической интерпретации характера и динамики давления:

1. а – медленноменяющегося;
2. б – медленноменяющегося, сопровождаемого пульсацией;
3. в – быстроменяющегося с постоянной составляющей;
4. г – быстроменяющегося без постоянной составляющей;
5. д – импульсного;
6. е – ударного;
7. ж – взрывного.

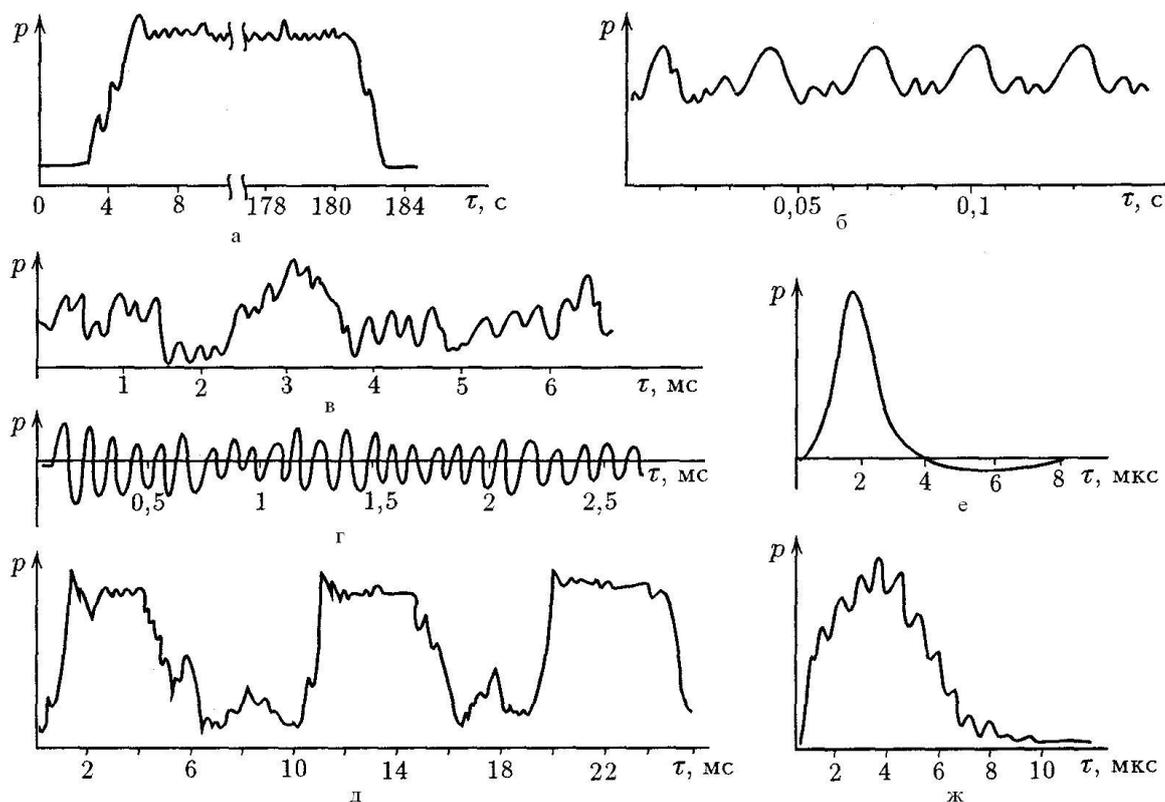


Рисунок 2.3 - Характер изменения давления во времени для различных типов давлений

Быстроменяющиеся давления (рисунок 2.3, б) включают в себя периодически меняющиеся и переходные процессы. Пульсация давления жидкости и газа и акустические шумы часто представляют собой случайный колебательный процесс (рисунки 2.3, б, г).

Импульсные давления имеют вид одиночных или периодически повторяющихся импульсов и характеризуются значительной амплитудой импульсов и коротким временем нарастания и спада процесса. Чаще всего эти процессы не имеют постоянной составляющей (рисунки 2.3, д-ж).

Наиболее жесткие метрологические требования предъявляются к датчикам и системам, измеряющим статические и медленноменяющиеся процессы. Это объясняется тем, что датчики должны с допускаемыми погрешностями одновременно измерять переходные процессы и установившиеся давления, сопровождаемые пульсацией. Эти требования противоречивы и во многих случаях трудно совместимы в одном датчике, так как для измерения

переходных процессов с малой погрешностью необходима высокая частота собственных колебаний и малая степень успокоения, а для малой погрешности измерения установившегося давления, сопровождаемого высокочастотной пульсацией, необходима низкая частота собственных колебаний и большая степень успокоения. Датчики, предназначенные для измерения быстроменяющихся и пульсирующих давлений, должны обладать малыми динамическими погрешностями, т. е. высокой частотой собственных колебаний и отсутствием механических и электрических резонансов в рабочем диапазоне частот измерения давлений и дестабилизирующих факторов. При этом для обеспечения допускаемых динамических погрешностей системы в целом все элементы системы (датчик–усилитель–преобразователь–регистратор) должны быть согласованы по частотным диапазонам измерений.

Сенсор деформации (СД) один из ключевых элементов датчиков давления и силы. Кроме того, сенсоры деформации используются для различных целей: измерения уровня деформаций и механических напряжений, возникающих в узлах и конструкциях технологического оборудования, вооружения, изделий летной и ракетно-космической техники.

Обобщенная структура СД приведена на рисунке 2.4, где условно показана входная величина деформации ϵ_x , которая, воздействуя на несущий элемент (подложку, пластинку, балку), вызывает в нем механические напряжения (σ_x), передающиеся на чувствительный элемент (ЧЭ). С другой стороны на ЧЭ от внешнего источника питания (ИП) подается поток энергии (\mathcal{E}) в виде напряжения, тока или частоты, который модулируется изменяющимися параметрами ЧЭ, зависящими, в свою очередь, от ϵ_x . Кроме того, в реальных условиях на СД воздействуют параметры внешней среды, в частности, температура ($T_{вн}$), вибрации, удары и проч., которые изменяют его характеристики. Таким образом, на выходе СД возникает сигнал Y , функционально связанный с ϵ_x , \mathcal{E} , $T_{вн}$:

$$Y = F(\epsilon_x, \mathcal{E}, T_{вн}) \quad (2.1)$$

Чаще всего роль ЧЭ выполняют тензорезисторы (ТР), которые закрепляются на подложке или объекте измерения специальными клеями или клеевыми композициями.

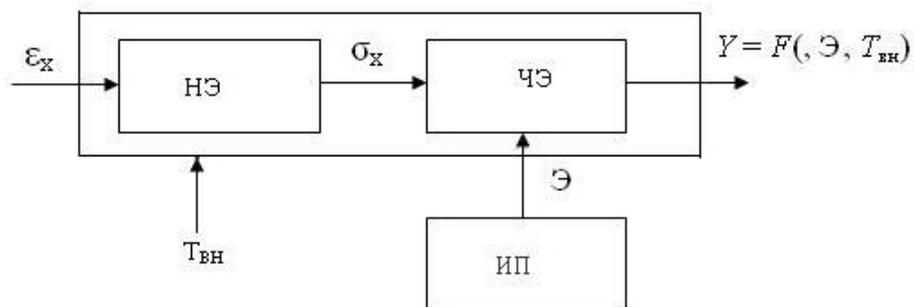


Рисунок 2.4 - Структурная схема сенсора деформации

Рассмотрим более подробно ТР, которые являются базовыми элементами СД. В настоящее время на практике используются проволочные, фольговые и полупроводниковые ТР, особенно первые и вторые. Кратко опишем принцип работы ТР и приведем основные расчетные зависимости [30].

Проволочные ТР представляют собой проволоку из высокоомного металлического сплава, сопротивление которой изменяется под действием напряжения, растяжения или сжатия.

Зависимость сопротивления проволоки ТР можно представить в виде:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}, \quad (2.2)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление материала проволоки; L и S – соответственно длина проволоки и площадь ее поперечного сечения.

При растяжении ТР его сопротивление изменится (возрастет или уменьшится) на величину ΔR и составит $R \pm \Delta R$, поэтому относительное изменение сопротивления может быть представлено соотношением:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \cdot (1 + 2\mu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (2.3)$$

где ΔL – изменение длины ТР; $\Delta \rho$ – изменение удельного электрического сопротивления; μ – коэффициент Пуассона.

Для применяемых металлических материалов $\Delta \rho / \rho$ – величина второго порядка малости, поэтому ей пренебрегают, тогда соотношение (2.3) будет выглядеть:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\mu). \quad (2.4)$$

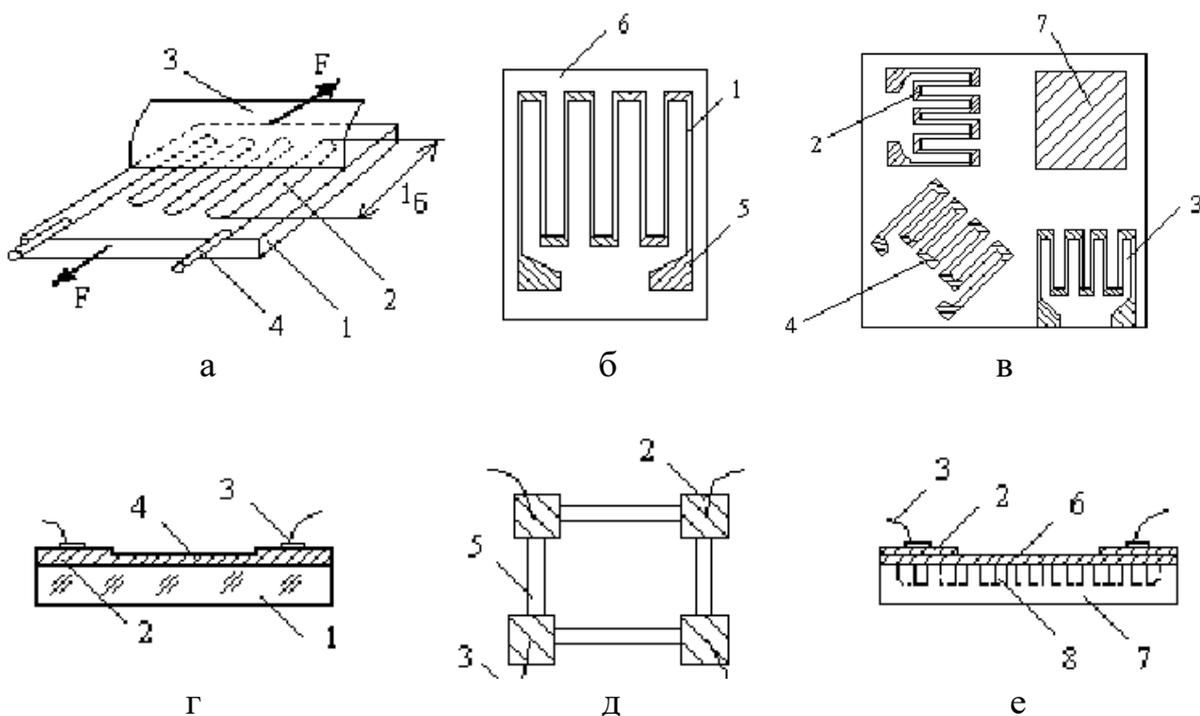
Так как $\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$ – относительная деформация ТР, то окончательно получим:

$$\frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{1 + 2\mu}{\varepsilon} = k, \quad (2.5)$$

где k – коэффициент тензочувствительности, он зависит от свойств материала и технологии изготовления ТР. Как правило, для большинства металлов $\mu = 0,4 \dots 0,6$, поэтому $k = 2 + 0,2$.

Устройство проволочного ТР схематично представлено на рисунке 2.5, а.

ТР состоит из подложки-основы 1, тензопроволоки 2, уложенной в виде решетки и приклеенной к основе, защитной пленки 3 и электрических выводов 4. Длина активной части ТР, которая изменяет свое сопротивление, называется базой ТР и обозначается как l_6 . В качестве основы (подложки) используют тонкую бумагу или пленку из бакелитового лака, клея БФ-2. На основе БФ-2 ТР работоспособны в диапазоне от - 40 до +70 °С, а на бакелитовом лаке - до +200 °С. Для обеспечения работоспособности ТР при более высоких температурах используются высокотемпературные клеи или цементы.



а - проволочный, б - фольговый одиночный, в - фольговый розеточный, г – тонкопленочный, д - замкнутый мост, е - диффузионный

Рисунок 2.5 - Конструкция тензо- и пьезорезистивных ЧЭ сенсоров деформации

Материалом тензопроволоки служат высокоомные сплавы, имеющие высокий коэффициент тензочувствительности и малый температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Этим требованиям отвечают ТР на основе сплавов хрома и никеля с кремнием (нихром, константан, сплав НМ23ХЮ и др.). Диаметр тензопроволоки 0,01...0,05 мм.

Следует отметить, что проволочные ТР отличаются сравнительно несложной технологией изготовления, поэтому могут изготавливаться самостоятельно на различных предприятиях для обеспечения собственных нужд.

Пленочные ТР более технологичны при изготовлении и применении, чем проволочные ТР. Конструктивно они представляют собой одиночный ТР или розетку из ТР, сформированных на изоляционной основе-пленке методом вакуумного напыления (тонкопленочный ТР) или травлением тонкой металлической фольги, наклеенной на изоляционную основу (фольговый ТР) (рисунок 2.5, б, в).

Розеточный вариант пленочного ТР позволяет фиксировать не только величину, но и направление механических напряжений. Топология (конфигурация) пленочных ТР может быть самой различной: меандровая, круговая, смешанная. В качестве основы пленочных и фольговых ТР используется полиимидная пленка (неметаллизированная и металлизированная).

Достоинством пленочных ТР является отсутствие клеевой прослойки между ТР и изоляционной пленкой, поэтому они имеют очень малые гистерезис и временной дрейф, что определяет их высокую временную стабильность. Недостатки по сравнению с фольговыми ТР – более высокое значение ТКС и большой разброс по номиналам, что требует необходимости использования в СД балансировочных резисторов. Материалами для ТР служат специальные сплавы на основе никеля, хрома с кремнием, которые для повышения стабильности легируются определенными металлами (ванадием, рением и др.) [31].

Полупроводниковые тензорезисторы обладают коэффициентом тензочувствительности, который более чем в 10 раз больше, чем у проволочных и фольговых ТР. Кроме того, механизм изменения их сопротивления иной, чем у металлических ТР, вследствие чего их называют пьезорезисторами (ПР).

Так, если у металлических ТР основной вклад в изменение сопротивления вносит изменение геометрических размеров ($\Delta L/L$ в формуле (2.3)), а составляющая от изменения удельного сопротивления $\Delta\rho/\rho$ мала, то у ПР – все наоборот: основная составляющая изменения сопротивления обусловлена изменением удельного сопротивления ($\Delta\rho/\rho$). Это объясняется значительным влиянием смещения энергетических уровней полупроводника при деформации.

Слабой стороной ПР, которая является общей практически для всех полупроводников, является их недостаточная термостабильность и ограниченный температурный диапазон работы [32].

ПР, как правило, используются в тех случаях, когда уровни измеряемых деформаций или очень малы, или необходимы точечные измерения на малых площадях.

Полупроводниковые СД чаще всего изготавливаются или в виде полупроводникового кристалла (балка, мембрана, подложка), в теле которого методами микроэлектронной технологии сформированы ПР, контактные площадки и проводники, или в виде одиночных ПР, или полупроводниковой пленочной мезаструктуры [33]. Полупроводниковые кристалл или пленка закрепляются на воспринимающем элементе (ВЭ) сенсора деформации. Съём электрического сигнала осуществляется с контактных площадок ПР. Схематичные конструкции нескольких типов полупроводниковых СД приведены на рисунке 2.5, г–е, где приняты следующие обозначения:

- 1 - кремниевый ПР;
- 2 - контактные площадки;
- 3 - электрические выводы;
- 4 - защитная пленка;
- 5 - полупроводниковая (кремниевая) пленка;

- 6 - слой двуокиси кремния;
- 7 - кремниевая подложка;
- 8 - диффузионный ПР.

Датчики силы. К силе принято относить следующие параметры: усилие, вес, крутящий элемент. Данные параметры вызывают деформацию (растяжение, сжатие, сдвиг) воспринимающего элемента, поэтому базовым чувствительным элементом для датчика силы (ДС) может служить видоизмененный элемент СД. Так, в большинстве случаев и поступают: монтируя конструктивно и технологически отработанный ЧЭ СД на ВЭ соответствующего сенсора, включают его в измерительную схему и нагружают силовым параметром, имея на выходе сигнал эквивалентный входному воздействию (усилию, весу, крутящему моменту).

Структурная схема ДС приведена на рисунке 2.6, где приняты следующие обозначения: ϵ -ЧЭ – деформационный чувствительный элемент; ЭС – электрическая схема. ВЭ – воспринимающий элемент.

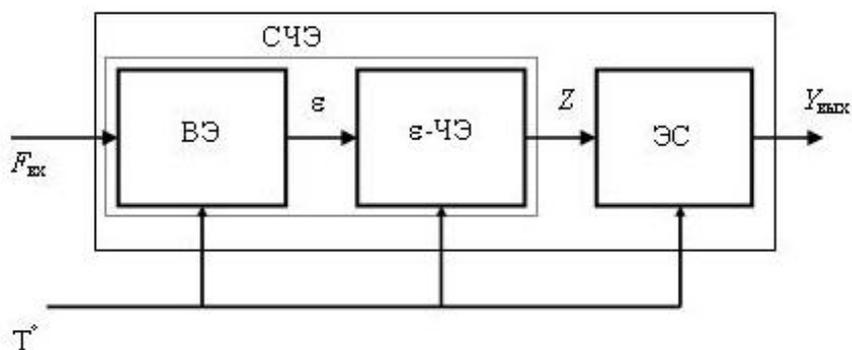


Рисунок 2.6 - Структурная схема датчика

Формула преобразования для ДС:

$$F_x \rightarrow \epsilon \rightarrow Z \rightarrow Y \quad (2.6)$$

В качестве промежуточной величины Z могут быть приняты следующие изменения физических величин: сопротивления ΔR для ТР; напряжения ΔU для потенциометрических ЧЭ; заряда ΔQ для пьезоэлектрических ЧЭ; Δf для акустоэлектрических ЧЭ; магнитных характеристик (B, L, M, H) для индуктивных и магнитоэлектрических ЧЭ; оптических характеристик для оптоволоконных ЧЭ.

Выходными величинами датчика силы в подавляющем большинстве являются электрические: напряжение, ток или сопротивление [34].

Следует отметить, что максимальное применение в датчиках силы по многим причинам нашел тензометрический принцип преобразования, так как тензорезисторные ЧЭ наиболее технологически отработаны, ТР выпускаются серийно, с ними не сложно проводить измерения и т. д. Поэтому в дальнейшем уделим основное внимание именно тензорезистивным ДС.

Рассмотрим некоторые базовые конструкции тензорезистивных силовосчувствительных элементов, схематично изображенных на рисунке 2.7 [35].

Так как при измерениях силовых параметров ВЭ должен работать в пределах упругих деформаций (с целью обеспечения линейности и механической надежности), в ДС конфигурация ВЭ, который называется упругим элементом (УЭ), имеет определенные закономерности. УЭ может быть выполнен как в виде простой консольной балки (рисунок 2.7, а) для ДС малой точности, так и в виде элементов сложных форм: балок равного сопротивления; профилированных балок; кольцевых конструкций (рисунок 2.7, б), для точных ДС (рисунок 2.7, д). Усложнение конструкции УЭ диктуется требованиями точности и диапазоном измеряемых усилий и весов. Тензорезисторы, как отдельные, так и в виде СД, закрепляются на поверхности УЭ в тех местах, где уровни механических напряжений максимальны, а их неравномерность минимальна. На балке равного сопротивления (рисунок 2.7, б) ТР могут монтироваться в любом месте УЭ, так как в ней механические напряжения одинаковы по всей длине. Для увеличения чувствительности УЭ ДС специальным образом профилируются, путем создания концентраторов механического напряжения в теле УЭ (выемки, проточки, пазы) – рисунки 2.7, в, г. Кроме того, сам УЭ может быть выполнен в виде тонкостенного кольца с силопередающими приливами (рисунок 2.7, д).

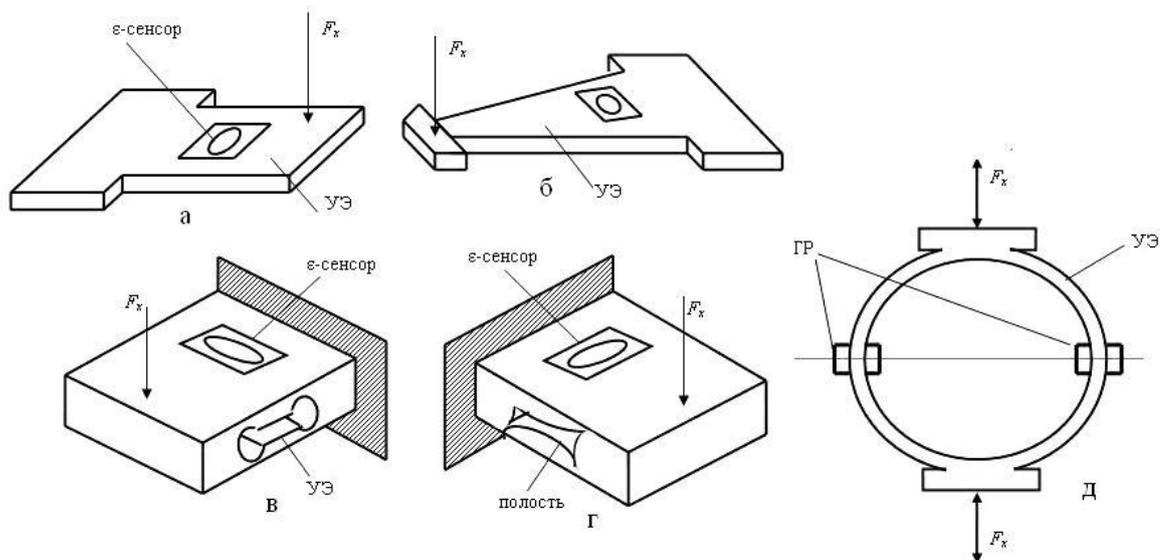


Рисунок 2.7 - Конструкции силовосчувствительных элементов тензометрических датчиков силы

Для отслеживания температуры в ДС, на его ЧЭ формируют температурный сенсор в виде, например, тонкопленочного резистора или термопары, навесного терморезистора. Это позволяет увеличить точность измерения путем введения поправок на температуру, а также повысить информативность процесса измерения за счет организации дополнительного канала измерения температуры [36].

2.2. Исследование и выбор методов преобразования тепловых параметров

2.2.1. Измерение тепловых параметров

К тепловым параметрам принято относить следующие величины [37, 38]:

- температуру;
- теплоемкость и теплоперенос;
- тепловые потоки.

Измерение температуры, как технологического параметра, широко используется в современных системах, оборудовании, изделиях различных отраслей. Температура по степени изменчивости является вторым после давления параметром. Кроме того, она является часто лишь косвенным параметром, применяемым при основных измерениях других параметров. Так, при измерениях расхода газа и жидкостей измерение температуры является обязательным, так как на нее вносится поправка, а при некоторых методах измерения температура является и основной контролируемой величиной, характерными примерами чего могут служить тепловые расходомеры, термокаталитические газовые ячейки, датчики влажности и пр.[39].

При измерениях плотности и массы нефтепродуктов температура контролируется для повышения точности измерения путем внесения поправок на нее, так же дело обстоит и с учетом газа, так как отсутствие учета изменения плотности от температуры приводит к значительным финансовым потерям. При старте, выходе на орбиту и орбитальном полете изделий ракетно-космической техники также требуется постоянное отслеживание и контроль температуры различных агрегатов и узлов. И таких примеров важности и необходимости измерения температуры можно привести множество.

Следует отметить, что наиболее применяемыми методами измерения температуры в совмещенных датчиках являются терморезистивный метод и контактные явления в проводниках и полупроводниках [40, 41].

Терморезистивный метод является наиболее распространенным и хорошо апробированным на практике. Принцип терморезистивного преобразования основан на температурной зависимости активного сопротивления металлов, сплавов и полупроводников, обладающих высокой воспроизводимостью и достаточной стабильностью по отношению к разнообразным дестабилизирующим факторам.

Температурную чувствительность термометрического материала принято характеризовать температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и термометрическим параметром ($W = \Delta R/R_0$) - рисунок 2.8.

Из рисунка видно, что металлы (1) обладают положительным, но малым W ; полупроводники (2) имеют отрицательный W , значение которого примерно на порядок больше, чем у металлов; полупроводниковые сегнетоэлектрические керамики (3) имеют положительный W величина которого довольно высокая, а в некоторых материалах (позисторная керамика), значение W на определенном участке термохарактеристики резко (на несколько порядков) возрастает.

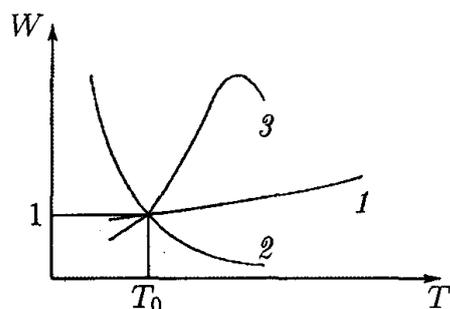


Рисунок 2.8 - Зависимость термометрического параметра W от температуры для металлических и полупроводниковых материалов

В ряду металлических материалов, используемых в термометрии, первое место, несомненно, принадлежит платине (Pt), которая широко используется в рабочих, образцовых и эталонных термометрах.

Температурный диапазон измерения платиновых термоэлементов от -269 до $+1100$ °С. Термометрическая платина для рабочих термометров характеризуется термометрическим параметром

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} = 1,391 \pm 0,001. \quad (2.7)$$

Для воспроизведения международной практической термометрической шкалы используется особо чистая платина в виде отожженной, свободной от напряжения проволоки, имеющей W

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} = 1,39250. \quad (2.8)$$

Зависимость сопротивления платинового термометра от температуры экстраполируется следующими выражениями:

$$W = 1 + At + Bt^2 \quad (2.9)$$

в диапазоне температуры от 0 до 850 °С;

$$W = 1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3 \quad (2.10)$$

в диапазоне температуры от -200 до 0 °С,

где $A = 3,968 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $B = -5,8 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$; $C = -4,1 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$.

Обозначение платиновых ТС: 50П, 100П

Второе место по распространенности применения в качестве термометрического материала в рабочих термометрах занимает медь. Поскольку медь относится к числу легко окисляемых металлов, диапазон ее применения ограничивается областью ± 200 °С (при защите до 300 °С).

В диапазоне температур от -50 до $+200$ °С медь имеет почти линейную температурную зависимость, которая с достаточной степенью точности описывается соотношением

$$W = 1 + \alpha T. \quad (2.11)$$

Обозначение медных ТС: 10М, 25М.

К числу недостатков меди относится ее малое удельное сопротивление $\rho = 0,017$ Ом·мм/м, что сказывается на размерах ТЧЭ.

Значительно реже платины и меди в термометрии используется никель. К его достоинствам относят высокую термочувствительность ($W_{100} = 1,64$) и удельное сопротивление $\rho = 0,072$ Ом·мм/м. Однако никель имеет значительно меньшую линейность термохарактеристики. В диапазоне температур от 0 до 200 °С никель имеет термометрическую зависимость вида

$$W = 1 + At + Bt^2, \quad (2.12)$$

где $A = 5,43 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $B = 7,85 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$.

2.2.2 Термочувствительные элементы, особенности конструкций и характеристик

Рассмотрим конструктивные особенности ТЧЭ, использующих различные физические принципы преобразования температуры в электрическую величину.

Проволочные ТЧЭ являются доминирующими в практической термометрии, однако в настоящее время с ними успешно конкурируют термометры в металлопленочном исполнении. В качестве ЧЭ таких термометров используются пленочные термосопротивления (ТС). Материалом для пленочных ТС служит никель (Ni), медь (Cu), платина (Pt). При этом Pt-ТС имеют наибольшие точность и диапазон измерения. Менее прецизионные, но более дешевые и технологичные ТС на основе меди и никеля используют для более узкого, чем у платиновых ТС, диапазона температур.

Такие термометры изготавливаются на различных подложках – из ситалла, сапфира, поликора – методом вакуумного напыления и имеют особую перспективу при массовом производстве. Большая часть операций по их изготовлению и подгонке номинала сопротивления практически полностью автоматизирована [42].

В металлопленочном исполнении ТС характеризуются меньшим, по сравнению с проволочными, значением ТКС (до 10 %).

Температурная зависимость сопротивления тонких металлических пленок от температуры $R_{\text{ТС}} = f(T)$ практически линейна, поэтому схемы с ними не требуют использования линеаризирующих элементов.

Общим недостатком ТС на основе металлических пленок являются небольшие номиналы сопротивления ТС из-за малого значения удельного

сопротивления и ТКС металлов (а соответственно мала и температурная чувствительность).

Достаточно широкое использование в настоящее время нашли толсто пленочные ТС, изготавливаемые на основе резистивных паст. Пасты позволяют изготавливать ТС от небольших номиналов (десятки и сотни Ом) до больших (кОм и МОм) с отрицательными и положительными ТКС (от -4 до $+0,5$) $\%/^{\circ}\text{C}$, а также одновременно контактную систему [43].

Температурная зависимость сопротивления толсто пленочных ТС – нелинейная, поэтому для линеаризации термохарактеристик применяют или включение их в мостовую схему, или используют последовательно-параллельное соединение ТС вместе с постоянными резисторами.

Высокой температурной чувствительностью обладают дискретные и интегральные полупроводниковые ТС. Для дискретного полупроводникового ТС зависимость сопротивления от температуры достаточно точно описывается выражением

$$R_T = R_N \exp(-B/T) \quad (2.13)$$

$$\alpha_R = -B/T^2, \quad (2.14)$$

где T – абсолютная температура; R_N и R_T – соответственно сопротивление ТС при N и T градусах; B – константа материала ТС (справочная величина), имеющая размерность градусов Кельвина [K].

Перспективными для использования в миниатюрных ДТ являются диффузионные и ионно-легированные терморезисторы. Благодаря широкому диапазону номиналов возможности изменения их ТКС в процессе изготовления, а также из-за малых габаритов и небольшой инерционности они находят все большее применение в совмещенных ДДТ (рисунок 2.9).

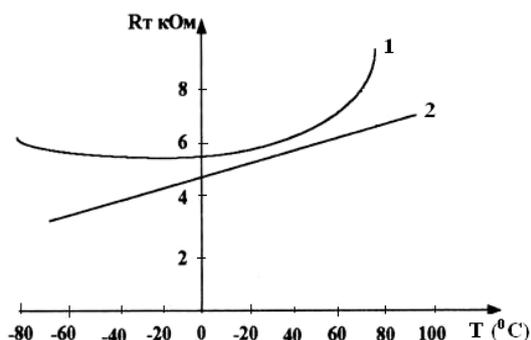


Рисунок 2.9 - Графические модели зависимостей сопротивления диффузионных (1) и ионно-легированных (2) интегральных ТС от температуры

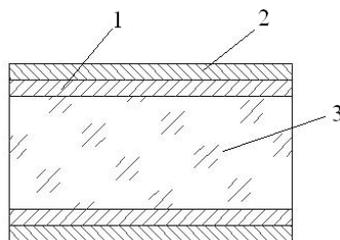
В связи с развитием микроэлектронных технологий и тенденции к микроминиатюризации элементов в настоящее время выпускаются

миниатюрные «чиповые» тонкопленочные, толстопленочные и диффузионные терморезисторы [44].

Данное направление миниатюризации ТР весьма перспективно с точки зрения снижения инерционности (повышения быстродействия) измерения и регулирования, снижения веса и увеличения точности. Благодаря лазерной настройке номинала ТР может быть на порядок уменьшен разброс в номиналах терморезисторов, что также благоприятно отражается на точности измерения и регулирования тепловыми процессами. А фактор уменьшения размеров ТР является определяющим при испытаниях авиационной и ракетно-космической техники.

Благодаря малым размерам, высокой точности и временной стабильности чиповые ТС широко используются в устройствах вычислительной техники (микропроцессорах, винчестерах и пр.), бытовых приборах (утюги, фены, кондиционеры, стиральные машины, СВЧ-печи и т.д.), промышленном оборудовании (силовые трансформаторы, электродвигатели и пр.) для диагностики и тепловой защиты.

Чиповые ТС изготавливаются, как правило, в бескорпусном исполнении и предназначены для последующего монтажа и герметизации в составе блока, системы, измерительного устройства. На рисунке 2.10 показан бескорпусный полупроводниковый чип-терморезистор.



1- контактная металлизация, 2 – припойная пленка, 3 – монокремний р-типа
Рисунок 2.10 - Полупроводниковый чип-терморезистор

Наиболее совместимыми с МЭД по размерам, потреблению энергии и по технологиям изготовления являются планарные ТС, которые могут формироваться в едином технологическом цикле производства микромеханических приборов - рисунок 2.11 [45].

На рисунке 2.11 приняты следующие обозначения: а) эпитаксиальный терморезистор с мезаструктурой; б) легированный терморезистор с окисной изоляцией; в) диффузионный терморезистор; г) ионно-имплантированный терморезистор; 1 – терморезистор; 2 – защитное покрытие; 3 – контактная металлизация; 4 – подложка; 5 – высоколегированная подконтактная область.

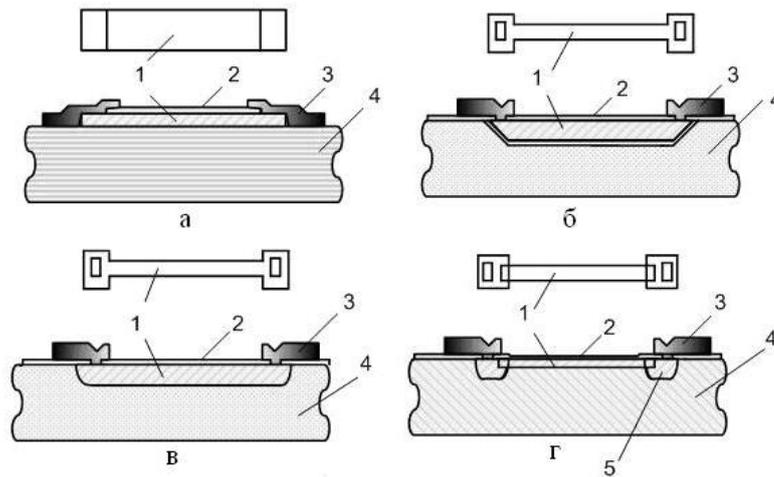


Рисунок 2.11 - Структуры интегральных ТС

У диффузионных и ионно-легированных терморезисторов основными характеристиками являются:

- 1) ТКС 0,5%/°C (−0,05...+0,5);
- 2) удельное сопротивление (ρ_s) 100...1300 Ом/□;
- 3) диапазон рабочих температур −60...+180 °C.

Такие терморезисторы обладают гораздо большей линейностью, чем рассмотренные ранее дискретные ТС.

Контактные явления в полупроводниковых структурах

Электрофизические эффекты, происходящие в полупроводниковых структурах: кремниевых с разным типом проводимости (nSi-pSi) и кремний-металл (Si-Me) все чаще и чаще используются для измерения температуры в различных приборах и изделиях, в том числе и в самих интегральных схемах. Из группы контактных явлений на практике используются такие, как электроперенос, диффузия носителей заряда и возникновение контактного потенциала [46]. Основной электрофизической моделью указанных явлений является вольтамперная характеристика p-n перехода [47].

$$I = I_0 \left(\ell^{q_e \frac{U}{kT}} - 1 \right), \quad (2.15)$$

где I – прямой ток через p-n-переход; I_0 – обратный ток; U – внешнее напряжение, приложенное к переходу; T – температура (К); k – коэффициент Больцмана; q_e – заряд электрона.

Упрощая (2.15) путем логарифмирования и отбрасывания малозначащих членов, получаем:

$$U = \frac{k \cdot T}{q_e} \cdot \ln \frac{I}{I_0}. \quad (2.16)$$

Из (2.16) путем дифференцирования по температуре, можно получить выражение для температурного коэффициента напряжения (ТКН) на р-п переходе от температуры:

$$\beta = \frac{dU}{dT} = -\frac{1}{T} \cdot \left(\frac{E_q}{q_e} - U \right), \quad (2.17)$$

где E_q – ширина запрещенной зоны р-п перехода.

Численную модель можно получить, подставляя в (2.17) значения нормальной температуры $T = 300$ °К, типового падения напряжения на р-п переходе $U = 0,5 \dots 0,8$ В, значения E_q для кремния и заряда q_e (справочные данные):

$$\beta = \frac{dU}{dT} \approx -(1,5 \dots 2) \frac{\text{мВ}}{\text{К}}. \quad (2.18)$$

Отрицательный знак у β означает, что при повышении температуры, падение напряжения на прямо смещенном р-п переходе – уменьшается. Для одиночного транзистора с переходом эмиттер-база, выражение (2.16) трансформируется:

$$U_{э-б} = VT, \quad (2.19)$$

где V – постоянная отрицательная величина равная $\approx -0,2$ мВ/К.

Соответствующая аналитической модели (2.19) графическая модель представлена на рисунке 2.12.

Следует отметить, что ИП температуры, на основе р-п-переходов (рисунок 2.13) отличаются высокой временной стабильностью, сравнимой со стабильностью эталонных платиновых термометров, но, в отличие от последних, имеют гораздо узкий температурный диапазон, ограниченный – $60 \dots +100$ °С.

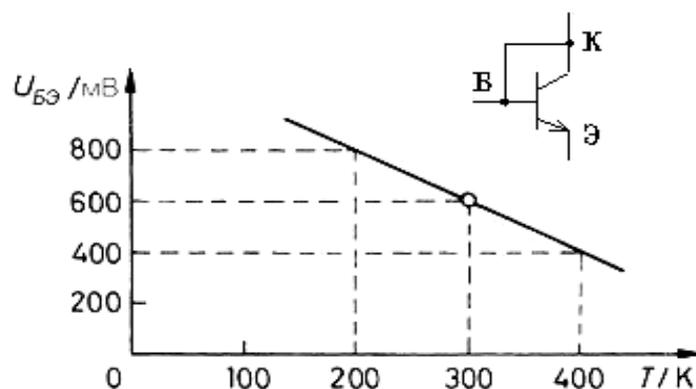
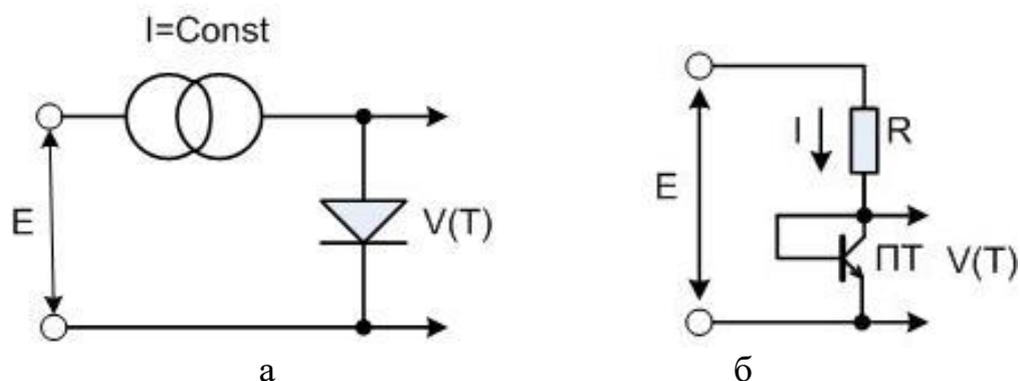


Рисунок 2.12 - Термохарактеристика перехода эмиттер–база планарного транзистора



а - на полупроводниковом диоде; б - на биполярном транзисторе
Рисунок 2.13 - Простейшие ДТ

Такие диодные термочувствительные элементы (ТЧЭ) – рисунок 2.13, могут работать в двух режимах:

- при прямом смещении (проводящем): в этом случае термозависимым может быть или прямой ток – зависимость (2.15) – или падение напряжения при постоянном прямом токе – зависимость (2.16);
- при обратном смещении (непроводящем): термозависимым параметром является или обратный ток I_0 , или сопротивление р-п-перехода.

В большинстве случаев используется режим прямого смещения, при котором измеряется падение напряжения.

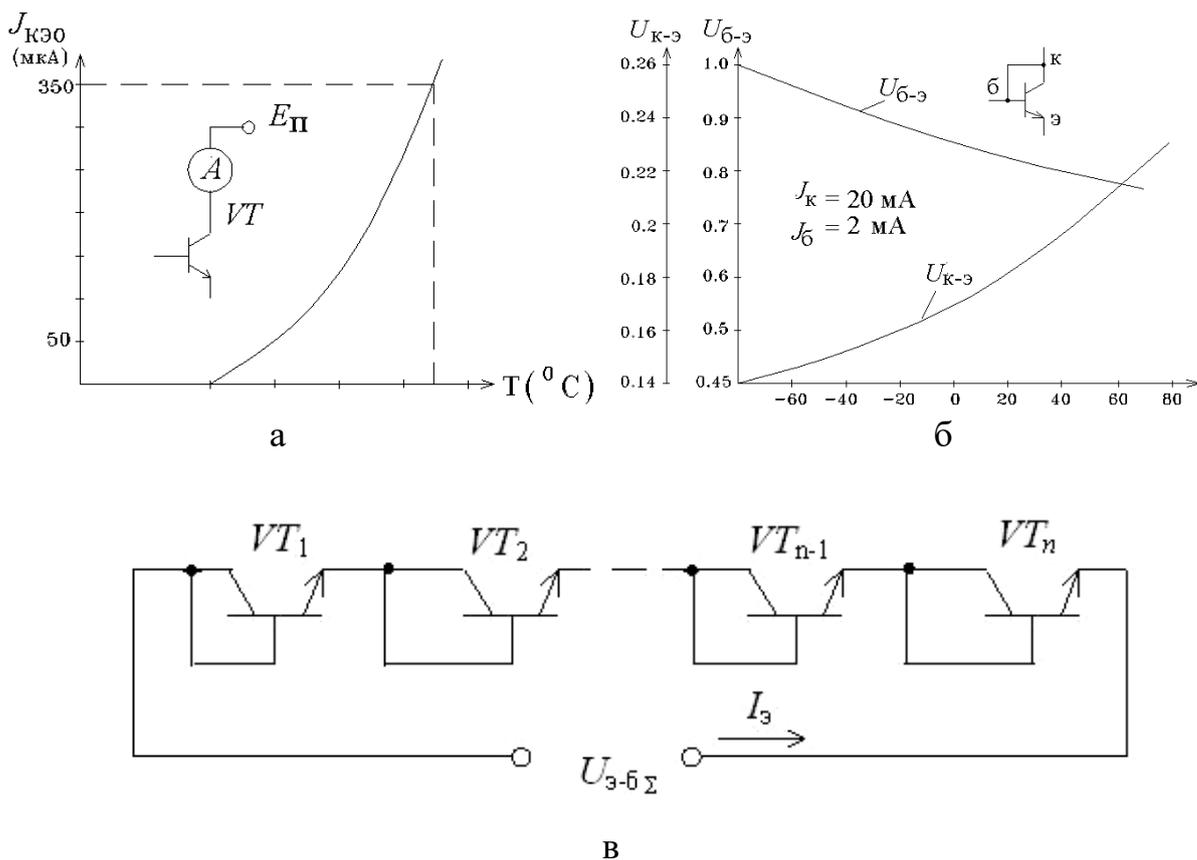
Повышение стабильности, линейности и точности преобразования температуры в электрический сигнал можно добиться, используя контактные явления, происходящие в транзисторных структурах – рисунок 2.13, б.

В качестве термометрических параметров в них могут использоваться [48]:

- коэффициент усиления β ;
- ток коллектора I_K или I_{K0} ;
- прямое напряжение на переходах «эмиттер-база» ($U_{э-б}$) и «база-коллектор» ($U_{б-к}$).

При этом наибольшую чувствительность получают, используя I_K , а наибольшую точность – при измерениях $U_{э-б}$ и $U_{б-к}$.

При использовании транзистора в качестве ТЧЭ его включают или как двухполюсник, используя один из переходов, чаще всего «э-к»; термозависимым параметром в этом случае будет I_{K0} (рисунок 2.14, а). При этом термохарактеристики транзистора подобны характеристике обратного смещенного диода, но с гораздо большей термочувствительностью (рисунок 2.14, б).



а – термохарактеристика обратного тока транзистора; б – термохарактеристики транзисторного термодатчика; в – схема объединения одиночных термочувствительных транзисторов в транзисторной матрице
 Рисунок 2.14 - Термохарактеристики транзисторных термодатчиков

Математическая модель, описывающая термохарактеристику многоэлементной транзисторной сборки может быть представлена

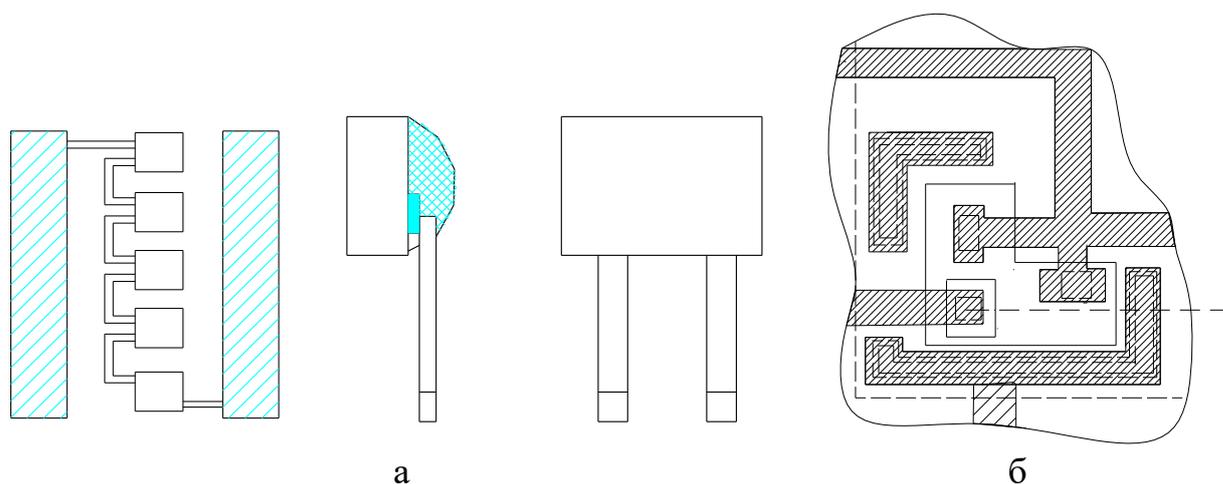
$$\Delta U_{\text{эб}} = U_{\text{эб}} - U_N = \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{I_s} - \frac{kT}{q} \ln \frac{I_c}{NI_s} = \frac{kT}{q} \ln N. \quad (2.20)$$

Так, для ТЧЭ на основе транзисторной матрицы 198НТЗ суммарный ТКН, при последовательном включении всех транзисторов будет:

$$\Delta U_{\text{э-б}\Sigma} / \Delta T = 10,5 \dots 11,5 \text{ мВ/}^\circ\text{С}.$$

Получено, что при $I_э = 100 \text{ мкА}$ нелинейность термохарактеристики в диапазоне $30 \dots 90 \text{ }^\circ\text{С}$ – менее $0,8 \dots 1,3\%$, тепловая инерция $30 \dots 40 \text{ с}$, долговременная стабильность $0,03 \text{ }^\circ\text{С/год}$.

Конструкции бескорпусных микроэлектронных термодатчиков на основе контактных явлений приведены на рисунке 2.15 а, а на рисунке 2.15 б изображена топология ТС в виде одиночного планарного транзистора, сформированного в теле полупроводниковой пластины, который отслеживает температуру кристалла [49].



а - на основе бескорпусных транзисторов; б - фрагмент топологии
Рисунок 2.15 - Конструкция МЭД температуры

Общим недостатком описанных диодных и транзисторных ТЧЭ является малый диапазон измерения в области положительных температур (он ограничен максимальной рабочей температурой р-п-перехода), составляющей не более 100...120 °С.

Для расширения температурного диапазона до 200 °С и выше (что характерно для экстремальных условий эксплуатации робототехнических систем), необходимо исключить изоляцию тензо- и терморезисторов с использованием р-п-переходов, обратные токи через которые ограничивают работу ЧЭ при высоких температурах [50]. Для высокотемпературных МЭД в качестве функциональных материалов используются поликремниевые структуры, кремний на сапфире, кремний на изоляторе и другие, в которых отсутствуют р-п-переходы [51].

Для измерения повышенных температур от 200 и до 2000 °С используются термопарные ТЧЭ, ЧЭ которых является неразъемное соединение (сварка, адгезинное) двух разнородных металлов или сплавов, например, меди и медно-никелевого сплава, железа и медно-никелевого сплава или платины и платинородиевого сплава (рисунки 2.16, 2.17).

Термоэлектрический эффект состоит в том, что концентрация свободных электронов в металле зависит от температуры. При наличии разности температур в проводнике возникает ЭДС и начинает протекать ток, при этом в более нагретом конце проводника возникает большая концентрация электронов по сравнению с менее нагретым.

Для создания замкнутой электрической цепи и измерения термоЭДС используют два спая, соединенных последовательно, один из которых является компенсационным, а второй – рабочим, помещенным в точку замера температуры (рисунок 2.16, а, б). Компенсационный спай или помещается в точку с постоянной стабильной (реперной) температурой (чаще всего помещается в сосуд с тающим льдом 0 °С), или же используется специальная электронная схема-компенсатор точки таяния льда. Термо-ЭДС, возникающая

между спаями, в зависимости от типа термопары составляет от 7 до 75 мкВ/°С [52].

Так, для термопары «медь–константан» $E = 40 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ в диапазоне $0 \dots 100 \text{ }^\circ\text{С}$, т. е. при разности температур спаев $100 \text{ }^\circ\text{С}$, термо-ЭДС равна 4,3 мВ. Для увеличения выходного сигнала используется соединение нескольких термоспаев в термобатарею (рисунок 2.16,в). В этом случае суммарная термо-ЭДС в n раз больше термо-ЭДС одного спая.

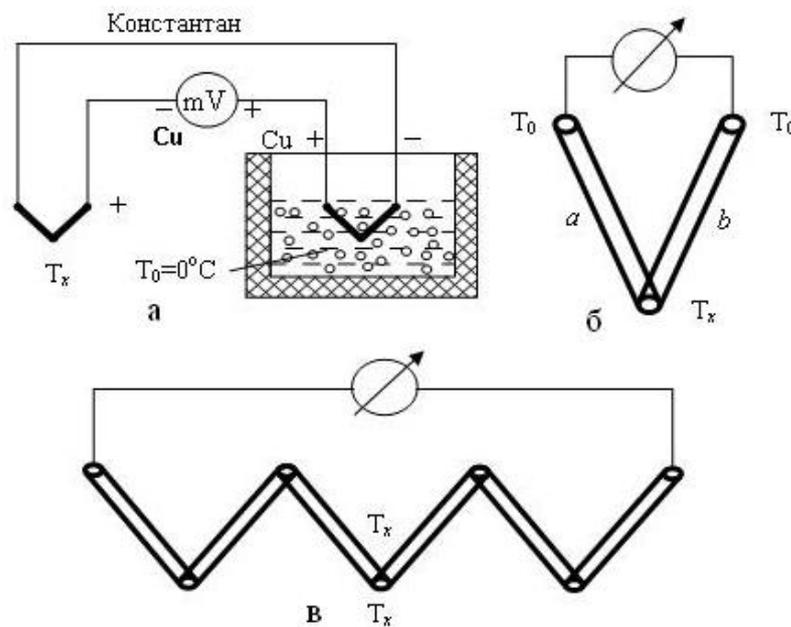
Математические модели, описывающие термоэлектрический эффект следующие:

$$E_{\text{ав}}(T_x, T_0) = E_{\text{ав}}(T_x) + E_{\text{ав}}(T_0), \quad (2.21)$$

где $E_{\text{ав}}(T_x)$ и $E_{\text{ав}}(T_0)$ – термо-ЭДС элементов цепи.

А так как $E_{\text{ав}}(T_x)$ при $T_0 = 0^\circ\text{С}$ – реперная температура, то

$$E(T_x, 0) = E_{\text{ав}}(T_x). \quad (2.22)$$



а - схема измерения, б - термопарный спай, в – многоэлементный термоэлемент
Рисунок 2.16 - Схемы возникновения и усиления термо-ЭДС

Высоким быстродействием и широким диапазоном измеряемых температур отличаются тонкопленочные термопарные ДТ, работа которых основана на эффекте Пельтье. Методы тонкопленочной технологии позволяют формировать малоинерционные термопары из пленочных композиций. Пример такого малогабаритного термопарного ТЧЭ приведен на рисунке 2.17. Данный ТЧЭ состоит из изоляционной подложки из керамики или ситалла, на поверхности которой сформирована пленочная композиция из чередующихся слоев различных металлов, образующих термоэлектрическую пару, например, никель-медь и проч. Сверху пленки защищаются пленкой, стойкой к внешним

воздействиям. В качестве защитных пленок могут служить пленки из двуокиси кремния и алюминия (SiO_2 , Al_2O_3), наносимых термическим, электронно-лучевым, магнетронным или газофазным осаждением, или высокотемпературные органические пленки, формируемые химическими методами [53].

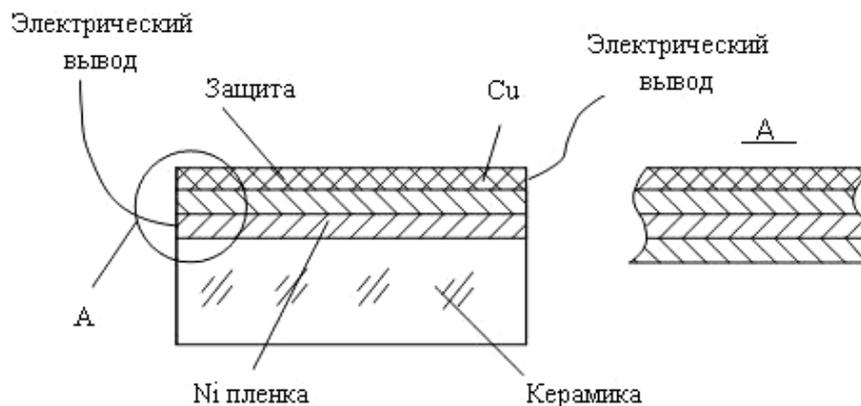


Рисунок 2.17 - Многослойная тонкопленочная термопара

Одним из перспективных методов одновременного измерения механических и тепловых величин одним ЧЭ является эффект генерации поверхностно-акустических волн (ПАВ) в некоторых монокристаллических сегнетоэлектрических материалах, в частности, в монокристаллическом кварце, ниобате лития, лангасите и лангатате [54, 55].

Эффект модуляции ПАВ (волны Релея, Лява, Стоуни) механическими или термомеханическими напряжениями звукопроводящей среды используется в ПАВ МЭД. Информативной величиной в них является акустическая задержка ПАВ – сигнала на нормированной длине звукопровода.

В ПАВ МЭД наибольшее распространение получили два типа преобразователей: 1 – линия задержки (ЛЗ); 2 - резонаторы, причем первые из них наиболее перспективны, так как в технологическом плане они совместимы с тонкопленочными элементами. Кроме того, ЛЗ ПАВ можно реализовать, используя изоляционные подложки, на которые нанесена пьезоэлектрическая пленка, ПАВ в них возбуждаются с помощью пленочных электродов. На рисунке 2.18 изображена структурная схема ПАВ – преобразователя, в котором используется ЛЗ.

Структурная формула ПАВ–преобразования:

$$P_{x,t} \rightarrow \varepsilon_{x,t} \rightarrow Q_{x,t} \rightarrow F(f_0, P_x, t) \quad (2.23)$$

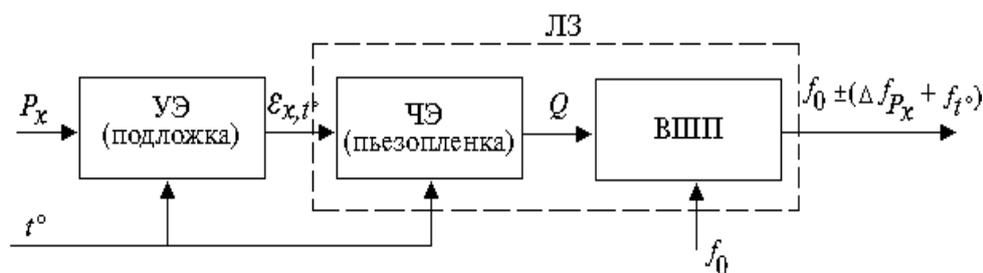


Рисунок 2.18 - Структурная схема ПАВ–преобразования

В общем случае выходной сигнал с ПАВ МЭД зависит от температуры и измеряемого механического параметра (давления или силы):

$$f(P, T) = n/\tau_a (P, T), \quad (2.24)$$

где f – частота ПАВ; n – константа, зависящая от моды колебания; τ_a – время задержки ПАВ в звукопроводящей среде; P и T – соответственно давление и температура.

Из приведенной зависимости видно, что ПАВ–преобразование позволяет сравнительно просто осуществлять одновременное измерение температуры и давления. В качестве примера на рисунке 2.19 схематично изображен диафрагменный ЧЭ МЭД давления и температуры [56].

При необходимости измерения только одного параметра или их селекции изменяют место расположения электродов (встречно–штыревых преобразователей (ВШП)): для измерения температуры ВШП располагаются на утолщенной части, а при измерении давления – на утонченной части диафрагмы.

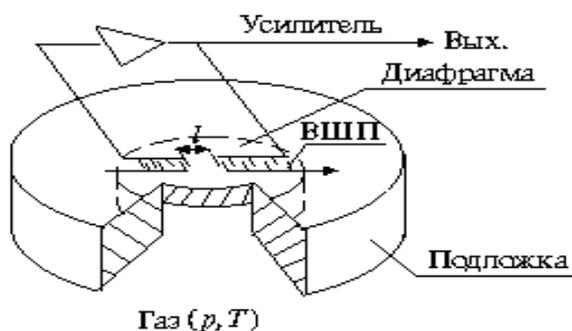


Рисунок 2.19 - ЧЭ МЭД давления и температуры, основанный на пьезоакустическом эффекте

Время задержки акустической волны на пути длиной L

$$\tau_a = L/v, \quad (2.25)$$

где v –скорость распространения ПАВ.

Дифференцируя выражение (2.25), получаем

$$d\tau_a / \tau_a = \alpha_p \cdot dP + \alpha_T \cdot dT, \quad (2.26)$$

где α_p , α_T – коэффициенты влияния соответственно давления и температуры на время акустической задержки, они также могут быть определены из соответствующих дифференциальных уравнений:

$$\alpha_p = (1/L) \cdot dL/dP - (1/v) \cdot dv/dP, \quad (2.27)$$

$$\alpha_T = (1/L) \cdot dL/dT - (1/v) \cdot dv/dT. \quad (2.28)$$

Необходимо отметить, что для анизотропных пьезоэлектрических сред α_T и α_p являются тензорными величинами, зависящими от кристаллографической ориентации используемых материалов [57]. Но, так как коэффициент α_T является менее ориентационно-зависимым по сравнению с α_p , приближенно α_T считают постоянным для данного материала.

Итоговая функциональная зависимость для ПАВ-преобразования, учитывающая уравнения (2.24...2.28), может быть представлена как

$$f(P, T) \approx f_0 [1 - \alpha_p \cdot P - \alpha_T \cdot (T - T_0)], \quad (2.29)$$

где f_0 – частота генератора при $P = 0$ и $T = T_0$.

Относительное изменение частоты будет иметь следующий вид:

$$1 - f(P, T) / f_0 = \alpha_p \cdot P - \alpha_T \cdot (T - T_0). \quad (2.30)$$

В случае постоянной температуры $T = T_0$ (лабораторные условия) имеем:

$$1 - f(P, T) / f_0 = \alpha_p \cdot P. \quad (2.31)$$

Откуда измеряемое давление

$$P = \alpha_p^{-1} \cdot [1 - f(P, T) / f_0]. \quad (2.32)$$

Так как α_p и f_0 – постоянные для данного материала, информативной величиной является частота автогенератора с ПАВ ЧЭ в цепи обратной связи.

Следует отметить, что дестабилизирующее значение температуры на ПАВ-преобразователь (выполненный в виде ЛЗ) выражается в тепловой деформации подложки и в изменении электрофизических характеристик звукопровода (в большей степени пьезоэлектрических коэффициентов).

На практике получена относительная температурная погрешность порядка 0,004 %/°C для частоты генератора (f_0), равной 200 мГц. При увеличении f_0 указанная погрешность уменьшается.

К достоинствам ПАВ–преобразователей можно отнести:

- частотную форму выходного сигнала;
- высокую добротность и помехоустойчивость;
- малые габариты.

Недостатки ПАВ–преобразователей:

- дрейф f_0 в результате старения подложки;
- нелинейность передаточной характеристики;
- значительная термозависимость электрофизических характеристик;
- малая чувствительность;
- необходимость применения СВЧ усилительно–преобразующей аппаратуры.

2.3. Совместимость методов преобразования в многофункциональных датчиках давления и температуры

Из используемых в настоящее время датчиков, наибольшей конструктивно-технологической гибкостью обладают полупроводниковые датчики, которые позволяют интегрировать на полупроводниковом кристалле тензо- и термочувствительные элементы, фоточувствительные, магниточувствительные структуры. В многофункциональных пьезоэлектрических датчиках возможно использование многофункциональных слоев или отдельных пьезоэлементов, на которые воздействует дополнительный параметр (температура или вибрации).

При разработке совмещенных ДДТ необходимо проводить оценку и исследования по совместимости ФЭ, а также материалов на предмет их использования для сенсорных элементов и структур. Эта совместимость должна быть обеспечена в нескольких основных направлениях:

1) Конструктивная (физико-химическая совместимость функциональных и силовых материалов по техническим характеристикам, отсутствие структурных и внутренних механических напряжений и проч.);

2) Технологическая, которая подразумевает близость и совместимость проводимых технологических операций и процессов, используемых при формировании термо-и тензочувствительных элементов на одном кристалле или подложке. Это ограничения по физико-термическим процессам (температурам и длительности проведения окисления, легирования и проч.)

3) Эксплуатационная, включающая надежность, временную и параметрическую стабильность, химическую и температурную стойкость к влиянию окружающей и измеряемой средам.

В частности, для полупроводниковых материалов методы, используемые при измерении силовых и тепловых параметров, приведены на схеме 2.20, в которой выделены группы методов, которые могут быть применены в совмещенных датчиках [58; 24, с. 6].

При составлении модели совместимости принципов преобразования давления и температуры в одном датчике, необходимо учитывать такие условия, как наличие ранее отмеченных экстремальных условий эксплуатации:

удары, вибрации, высокие и низкие температуры, помехи, значительные перегрузки и проч. Поэтому традиционные для КИП и автоматики методы преобразования: оптические, гидравлические, пневматические нецелесообразны для использования в совмещенных датчиках.

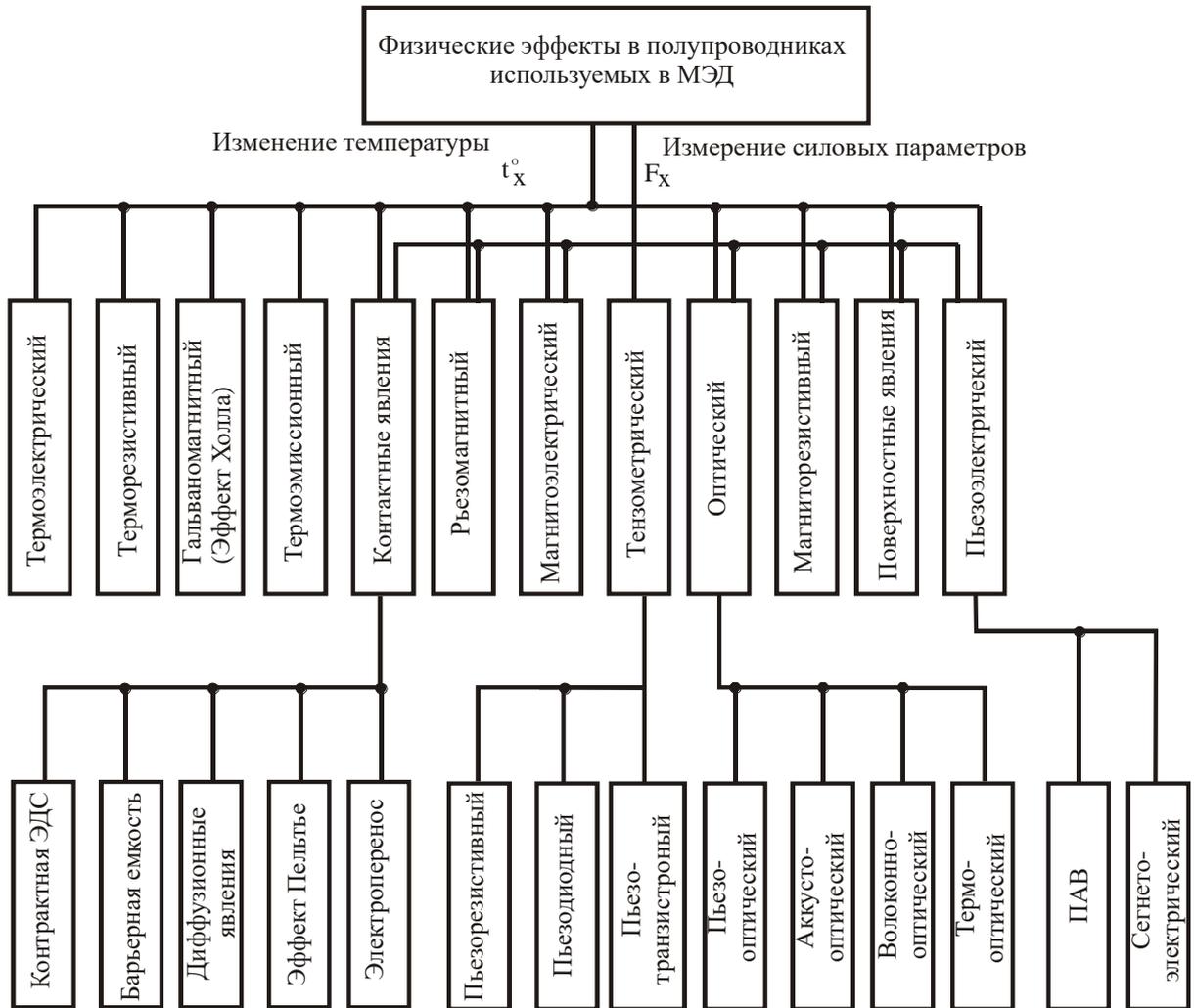
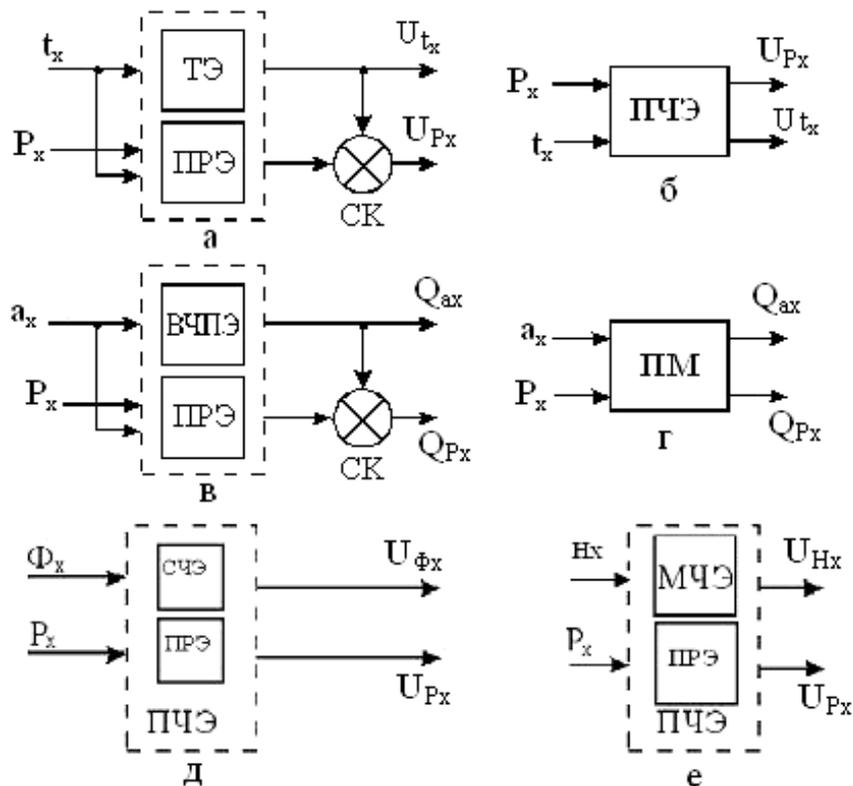


Рисунок 2.20 - Физические эффекты в полупроводниках, используемые для измерения силовых и тепловых величин

Полупроводниковые МЭД в наибольшей степени совмещаются с микропроцессорными измерительными преобразователями. Структура многофункциональных датчиков приведена на рисунке 2.21. Поясним некоторые особенности структур многофункциональных датчиков, изображенных на рисунках. Так для пьезоэлектрических датчиков термочувствительный элемент может быть объединен с рабочим пьезоэлементом в монолитный пьезомодуль. Виброчувствительный пьезоэлемент (ВЧПЭ) выполняется в виде автономного пьезоэлемента, соединенного с инерционным грузом [59].

Магниточувствительные элементы могут быть выполнены в виде металлической пленки из магнитотвердого материала, например, из пермаллоя или никеля, магнитодиодной полупроводниковой структуры и проч. [60].

Светочувствительный элемент может быть выполнен в виде фоторезистора, фототранзистора, фотодиода [61].



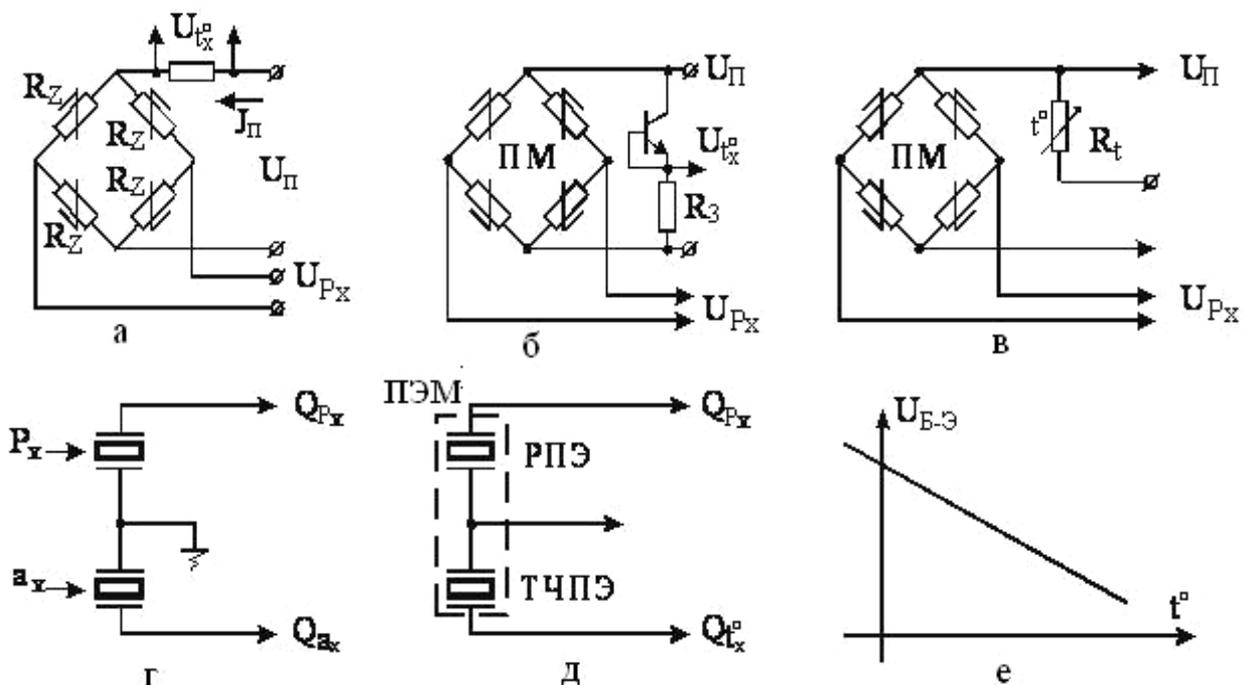
а, б - давления и температуры в, г - вибрации и давления, д - светового потока и давления, е - магнитного поля и давления

ТЭ - термоэлемент; СК - схема термокомпенсации; ПРЭ - пьезорезистивный элемент; ПЧЭ – полупроводниковый чувствительный элемент; СЧЭ - светочувствительный элемент; МЧЭ - магниточувствительный элемент; ПМ – пьезомодуль, ВЧПЭ – виброчувствительный пьезоэлемент

Рисунок 2.21 - Структурные схемы многофункциональных датчиков

На рисунке 2.22 приведены возможные принципиальные схемы полупроводниковых и пьезоэлектрических датчиков с элементами, реагирующими на температуру и вибрацию. На рисунке 2.22, а в качестве термочувствительного параметра использован ток питания тензомоста; на рисунке 2.22, б - сопротивление перехода «Э-Б» транзистора, включенного в обратном направлении; на рисунке 2.22, в - сопротивление терморезистора. На рисунке 2.22, г и 2.22, д – пьезодатчики давления вибраций динамических давлений и температуры соответственно.

На рисунке 2.22, е представлен график зависимости напряжения эмиттер–база транзисторного ТД от температуры на переходе.



ПМ – пьезомост; ПЭМ – пьезоэлектрический модуль; РПЭ-рабочий пьезоэлемент; ТЧПЭ-термочувствительный пьезоэлемент
 Рисунок 2.22 - Принципиальные схемы multifunctional датчиков

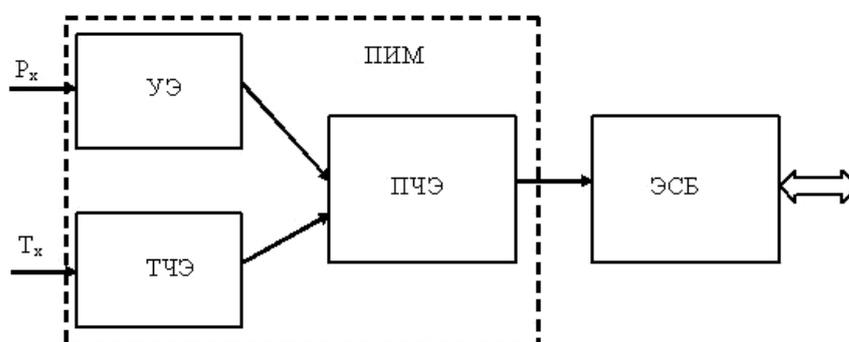
Выводы по 2 разделу

1. При проведении исследований методов преобразования силовых параметров, в качестве базовых выбраны пьезорезистивный и емкостной методы.
2. При проведении исследований методов преобразования тепловых параметров, в качестве базовых выбраны терморезистивный и контактные методы.
3. Проведен анализ конструкций и характеристик различных термочувствительных элементов, который показал перспективность твердотельных ТС, сформированных на поверхности или в объеме функционального материала.
4. Применительно к multifunctional датчикам давления и температуры исследована физическая и функциональная совместимость методов преобразования, что позволило выявить конструктивно и технологически совместимые методы с учетом условий эксплуатации датчиков.

3 РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ И СТРУКТУР СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1 Моделирование элементов и структур совмещенных датчиков давления и температуры.

Исходя из структурной схемы МЭД давления и температуры (рисунок 3.1), можно выделить следующие его элементы, от которых в первую очередь зависят основные ТХ (механическая прочность, надежность, быстродействие, диапазон измерения, временная стабильность, геометрические размеры): воспринимающий (упругий) элемент, ТЧЭ, ИМ, электронный согласующий блок.



УЭ – упругий элемент, ТЧЭ – термочувствительный элемент, ПЧЭ – полупроводниковый чувствительный элемент, ПИМ – полупроводниковый измерительный модуль, ЭСБ - электронный согласующий блок

Рисунок 3.1 - Структурная модель датчика давления и температуры

Как видно из рисунка, на первом месте в датчике стоит УЭ, который в основном определяет многие прочностные и метрологические характеристики всего датчика [62, 63]. Таким образом, УЭ должен в процессе работы отслеживать воспринимаемые им динамические давления (рисунок 2.3) и корректно преобразовывать их в механическую деформацию при минимальных искажениях и остаточных явлениях [64, 65].

Необходимость на практике восприятия и преобразования быстропеременных и импульсных сигналов, имеющих, как правило, сложную форму во времени, заставляет производить оценку динамических свойств УЭ и определять погрешность, вносимую УЭ.

Высокие динамические характеристики УЭ необходимы для того, чтобы обеспечивать минимальные погрешности при измерениях нестационарных процессов и величин, в качестве которых могут выступать различные типы давлений.

При создании новых образцов и модернизации существующей измерительной аппаратуры, в частности МЭД, широко используется моделирование конструкций, схем и отдельных элементов, что позволяет уже

на ранних стадиях спрогнозировать основные технические характеристики датчиков, а также в значительной мере сократить время их разработки.

Моделирование упругих элементов датчиков

Следует отметить, что для моделирования УЭ на рынке представлено множество пакетов специализированных программ, которые являются многофункциональными, и их принцип работы чаще всего основан на методе конечных элементов или электрических аналогов.

Пакеты компонентного моделирования подразделяются на универсальные (ANSYS, MatLab, Simulink, SolidWorks) [66-69] и предметно-ориентированные (Electronics Workbench, Micro-Cap) [70] программные пакеты. Для компьютерного моделирования неоднородных технических систем часто используется пакеты ANSYS. В нем применяется метод конечных элементов для решения таких задач, как расчет формы тел при деформации, расчет прочности конструкций, подвергающихся статическим и динамическим нагрузкам, моделирование течения жидкости и газа, распространения тепла, моделирование электротехнических систем, расчет электрического и магнитного полей и другие. Эта универсальная программа по компьютерному инжинирингу позволяет анализировать устойчивость систем, изучать переходные процессы, решать оптимизационные задачи.

К предметно-ориентированным программным средствам автоматизации моделирования, предназначенным для моделирования систем, принадлежащих определенному физическому классу, относятся MultiSim, Simulink, AutoCAD, SolidWork, LabVIEW и другие [71, 72]. Они не позволяют создавать и исследовать компьютерные модели других физических классов, а также физически неоднородных объектов и систем.

Пакеты AutoCAD, Компас 3D, SolidWorks, созданы для трехмерного моделирования и автоматизированного 3D-проектирования. Он используется в машиностроении, газодинамике, приборостроении, двигателестроении, конструировании технологической оснастки и т. д.

Для исследования электронных схем применяются прикладные пакеты OrCAD, MultiSim, Workbench, Comsol и др.

Анализ функциональных возможностей и доступности указанных программ показал следующее:

1) Большинство оригинальных программ моделирования стоят очень дорого, а выпускаемые в некоторых случаях упрощенные их демоверсии не обладают основными функциями, поэтому зачастую бесполезны.

2) Программы, за некоторым исключением имеют большой объем, поэтому для их корректной работы необходимы ПК с большой оперативной и постоянной памятью, а также с высоким быстродействием.

3) Программы имеют сложный, интуитивно не всегда понятный интерфейс и для работы с ними необходимо значительное время и хорошие навыки, а также знание английского языка, так как в большинстве интерфейс и помощь – англоязычные.

4) У всех программ излишне большое число не востребованных функций.

В связи с вышеперечисленными недостатками требуется разработка информационной системы, предназначенной для моделирования важнейших динамических характеристик УЭ, которая использует общедоступное ПО: Mathcad, Excel, Visio и др. Интерфейс указанных программ интуитивно понятен, они не занимают много места на диске и легко устанавливаются на ПК.

Поясним, применительно к УЭ основные метрологические формулировки и понятия [73, 74].

Важной характеристикой УЭ является функция преобразования (ФП) - зависимость выходного сигнала от входного сигнала.

Динамические характеристики УЭ - это характеристики свойств УЭ, проявляющиеся в том, что на выходной сигнал УЭ влияет значение входного сигнала и различные изменения этих значений во времени.

К динамическим характеристикам относятся:

Переходная характеристика УЭ - это временная характеристика его, полученная при ступенчатом изменении входного сигнала.

Импульсная переходная характеристика УЭ - временная характеристика его, получаемая в результате приложения к входу УЭ входного воздействия в виде дельта-функции (функции Дирака).

АЧХ УЭ - зависящее от круговой частоты отношение выходного сигнала в установившемся режиме к амплитуде входного синусоидального сигнала.

Частные динамические характеристики:

- время реакции;
- коэффициент демпфирования (степень успокоения);
- постоянная времени;
- значение АЧХ на резонансной частоте;
- значение резонансной или собственной частоты.

Поясним некоторые из вышеуказанных ТХ:

1) время реакции - время установления выходного сигнала.

2) коэффициент демпфирования - коэффициент β в дифференциальном уравнении, описывающем датчик:

$$x + 2\beta\omega_0^2 \cdot x = 0 \quad (3.1)$$

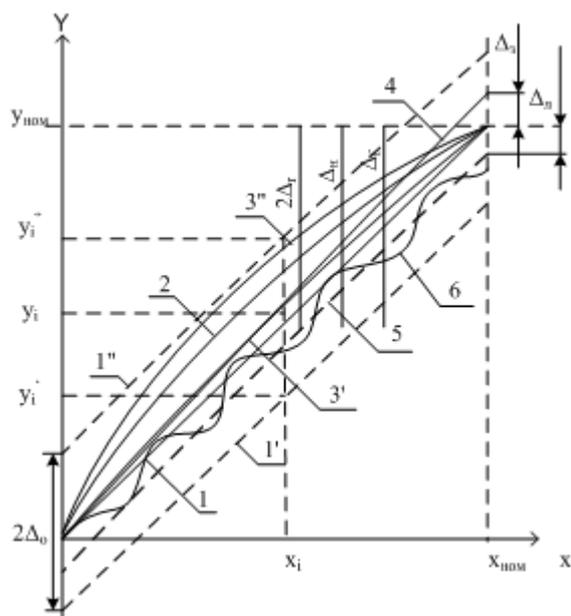
где ω_0 - собственная частота колебаний УЭ:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{w}{m}} \quad (3.2)$$

где w - жесткость УЭ, m - эквивалентная подвижная масса ИП.

3) резонансная частота - частота, соответствующая максимуму резонансной кривой.

Как было отмечено, большинство статических и динамических характеристик УЭ определяет передаточная характеристика УЭ, представленная на рисунке 3.2 в виде графической модели.



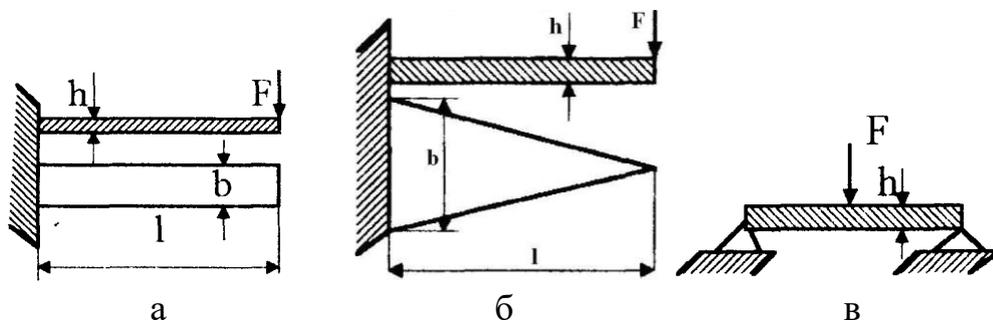
1 – ФП без учета влияющих величин; 1', 1'' – прямые, ограничивающие область возможных измерений ФП из-за действия влияющих величин; 2 – ФП с учетом нелинейности; 3', 3'' – ФП с учетом гистерезиса; 4 – ФП с учетом повышения температуры; 5 – ФП с учетом воздействия линейного ускорения; 6 – ФП с учетом воздействия

Рисунок 3.2 - График функции преобразования УЭ

Исследование и анализ конструкций УЭ датчиков

В УЭ датчиков силовых параметров (силы, давления, деформации, крутящих моментов) используются различные типы УЭ (рисунки 3.3–3.5).

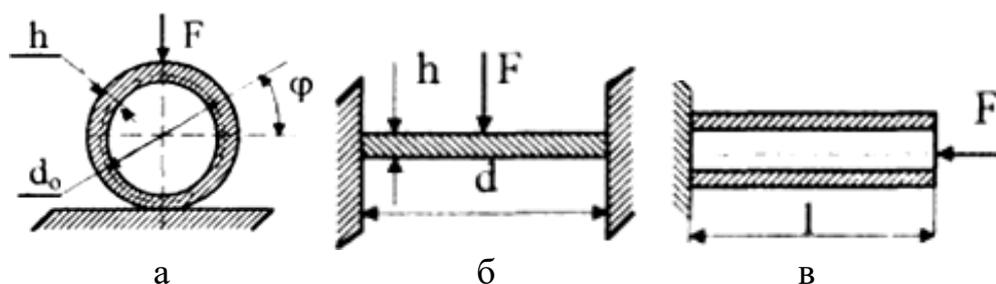
- балочные в виде консольных балок, балок равного сопротивления изгибу, опёртой балки (рисунки 3.3, а-в);
- кольцевых (рисунок 3.4, а);
- мембран (рисунок 3.4, б);
- полых и сплошных стержней (рисунок 3.4, в);
- однослойных и многослойных пьезопластин (рисунок 3.5, а, б).



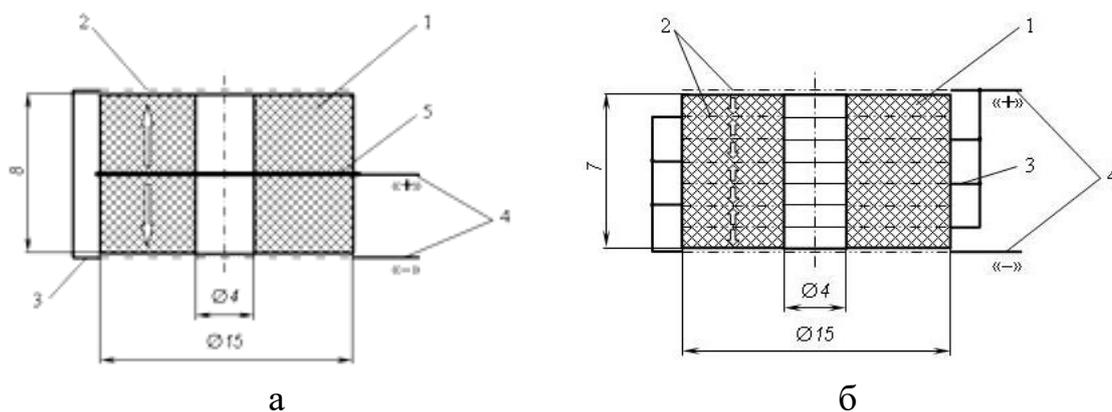
F – сила, h – толщина, b – ширина, l - длина

а - консольная, б – равного сопротивления изгибу, в – опёртая,

Рисунок 3.3 - Балочные УЭ ИП



а - кольцевого, б – мембранного, в – стержневого
Рисунок 3.4 - Конструктивные модели УЭ различного типа



1 - слой пьезокерамики, 2 - электрод, 3 - проводник коммутационный, 4 – вывод проволочный, 5 - токосъемная пластина

а - двухслойный, б – семислойный

Рисунок 3.5 - Многослойные пьезоэлектрические ЧЭ

3.2. Исследование динамических характеристик УЭ датчиков

Исследование частотных характеристик УЭ

Теоретическое и экспериментальное определение полных динамических характеристик УЭ представляется чрезвычайно сложной, дорогой и трудоемкой задачей. Тем не менее, исследование ТХ УЭ позволяет оптимизировать конструкции и себестоимость УЭ с точки зрения отношения: цена/качество.

Так, например, АЧХ механической колебательной системы с входным воздействием в виде силы и выходным сигналом в виде перемещения (рисунок 3.6) может быть описана ММ [75]:

$$M = \frac{1}{\sqrt{(\eta^2 - 1) + (2\beta\eta)^2}} \quad (3.3)$$

где $\eta = \frac{\omega}{\omega_0}$ относительная частота вынуждающей силы, β - степень успокоения (коэффициент демпфирования), ω - частота вынуждающей силы, ω_0 - собственная частота колебательной системы.

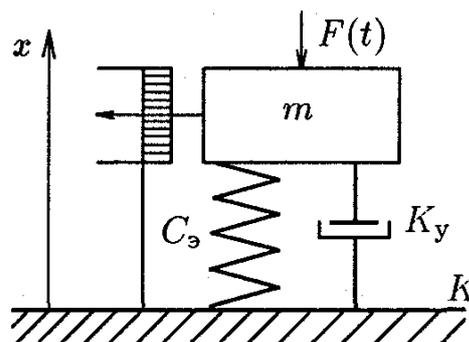


Рисунок 3.6 - Математическая модель колебательной системы УЭ ДД

Анализ представленных на рынке УЭ МВ показывает, что подавляющая часть таких УЭ представляет собой колебательную систему. Поэтому выражение (3.1) является математическим описанием АЧХ подавляющего большинства ДМВ.

На рисунках 3.7, 3.8 представлены АЧХ 3-х образцов ДД: первый УЭ с собственной частотой $f_{01} = \omega_{01}/2\pi$ и степенью успокоения β_1 , второй - с собственной частотой $f_{02} > f_{01}$ и той же величиной степени успокоения β_2 , что и у первого УЭ и третий - с собственной частотой, равной собственной частоте первого УЭ, но со степенью успокоения $\beta_3 > \beta_1 = \beta_2$. Из кривых рисунка 3.7 видно, что собственная частота и степень успокоения определяют граничную частоту ($f_{гр1}$, $f_{гр2}$ или $f_{гр3}$) и позволяют найти погрешность γ_i (амплитудно-частотную), т.е. решить задачу анализа или по заданной величине АЧХ найти параметры УЭ (граничную частоту), т.е. решить задачу синтеза.

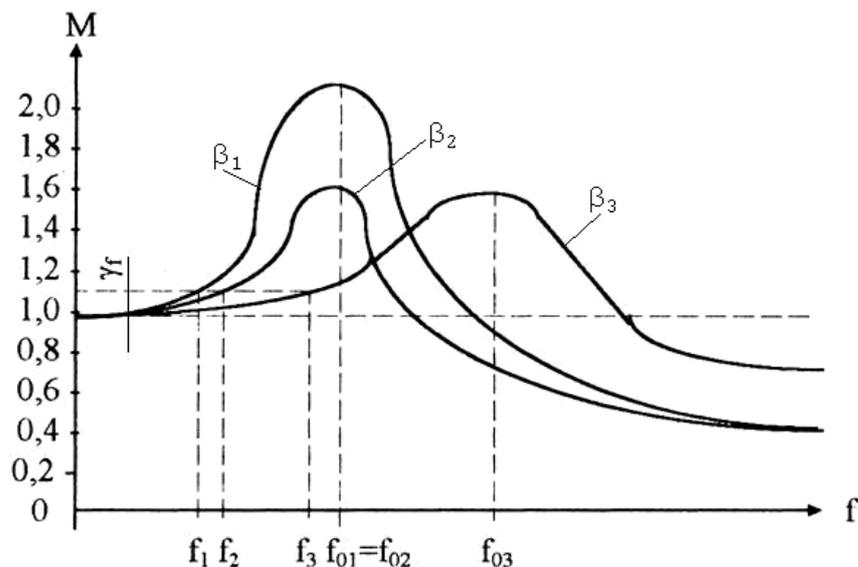


Рисунок 3.7 - АЧХ трех типов УЭ с различной степенью успокоения

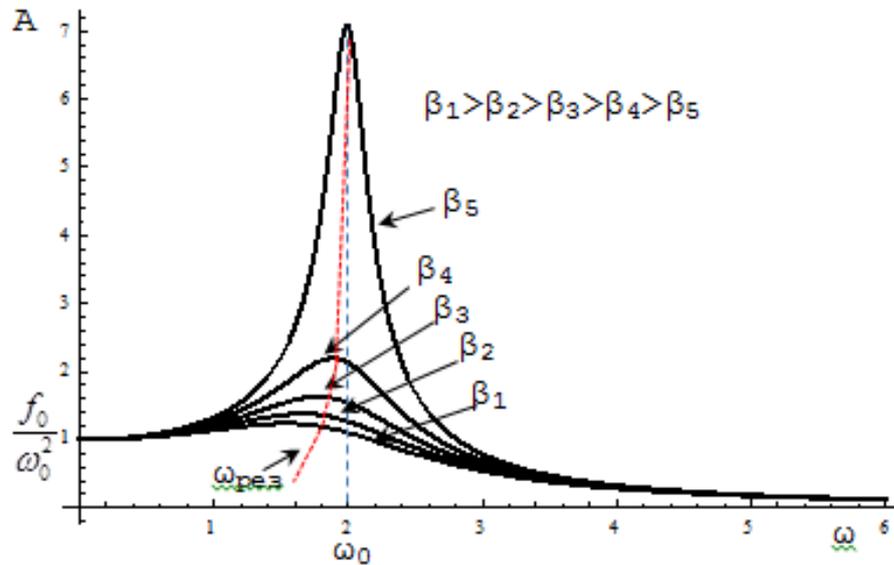


Рисунок 3.8 - Семейство АЧХ для УЭ, имеющих различную степень успокоения и одинаковую резонансную частоту

Визуальный анализ кривых рисунков 3.7, 3.8 также показывает, что существенное влияние на величину граничной частоты (или амплитудно-частотной погрешности) оказывает степень успокоения. Но, как показывает анализ существующих УЭ механических величин, большая их часть не имеет специальных демпфирующих устройств, обеспечивающих требуемую величину степени успокоения. Успокоение в таких УЭ обеспечивается внутренними свойствами деталей УЭ и, в первую очередь, внутренним трением материала УЭ. Но поскольку УЭ чаще всего изготавливаются из высококачественных металлов, у которых внутреннее трение мало, то и степень успокоения, хотя и отличается в несколько раз, но она очень мала. Исследования [76] показали, что степень успокоения в УЭ механических величин $\beta = (0,02 \div 0,06) < 1$. При этом условием начальной части АЧХ, определяющей граничную частоту (или амплитудно-частотную погрешность) практически не зависит от величины степени успокоения, и поэтому можно утверждать, что единственной характеристикой, определяющей динамические свойства УЭ для ДМВ, является его собственная частота. Знание ее позволяет по заданной величине граничной частоты найти значение амплитудно-частотной погрешности или решить обратную задачу [77].

Расчет собственных частот измерительных преобразователей

Анализ взаимосвязи конструктивных элементов в УЭ ДМВ, и их характеристик показывает, что собственная частота УЭ полностью определяется собственной частотой колебаний УЭ в направлении действия входной величины. В настоящее время имеется много различных ММ для расчета собственной частоты механических систем. К наиболее известным выражениям относятся [78; 28, с. 87]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{W}{J}} \quad (3.4)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{ст}}}, \quad (3.5)$$

где W - жесткость системы; J - момент инерции системы; $\delta_{ст}$ - статический прогиб системы - прогиб системы под действием силы тяжести системы; g - ускорение свободного падения.

Выражения (3.4) и (3.5) являются чрезвычайно простыми ММ. Однако использование их для практических целей затруднено. Кроме того, эти ММ не позволяют явно увидеть связь собственной частоты с параметрами и характеристиками УЭ как механической системы.

Такая связь может быть установлена, если пользоваться выражениями для расчета собственной частоты механической системы, характеризуемой определенной формой. Как ранее было отмечено в настоящее время наибольшее распространение получили УЭ следующих форм:

- цилиндрической (стержневые УЭ);
- кольцевой (кольцевые УЭ);
- балочной (балочные УЭ);
- мембранной (мембранные УЭ).

Если требуется рассчитать собственную частоту колебаний стержневого ЧЭ, то можно воспользоваться известной формулой для собственной частоты продольных колебаний стержня [28, с. 90]:

$$f_0 = \frac{0,159\pi}{2l} \sqrt{\frac{S_{ст} E}{m}}, \quad (3.6)$$

где l - длина стержня, m - масса единицы длины стержня. E - модуль упругости материала стержня, $S_{ст}$ - поперечное сечение стержня.

В ММ (3.6) обнаруживается связь между собственной частотой и параметрами и характеристиками стержня, как УЭ. Однако параметры $S_{ст}$ и m - являются тоже взаимосвязанными, что может привести к неверным результатам. Поэтому, представив $m = S_{ст} \rho$, где ρ - плотность материала, можно получить

$$f_0 = \frac{0,249}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.7)$$

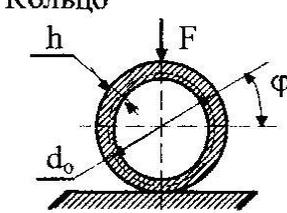
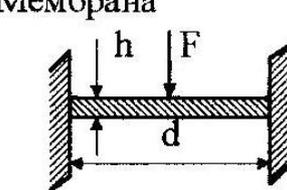
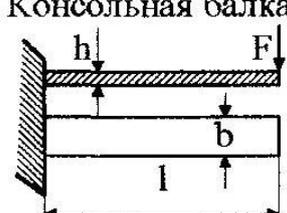
На основании библиографических исследований по различным источникам [6, с. 45; 28, с. 87] ММ собственных частот УЭ различных конфигураций, можно получить обобщенное выражение для расчета собственной частоты УЭ любой формы в следующем виде:

$$f_0 = \frac{C}{l_{об}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.8)$$

где $l_{об}$ – обобщенная длина УЭ; C – конструктивный коэффициент, характеризующий быстродействие УЭ.

Данная модель является универсальной, с помощью которой можно оценивать возможности УЭ в части динамических характеристик. Величины $l_{об}$ и C , определенные по указанной методике и полученным ММ для основных форм и конфигураций УЭ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – ММ собственных частот УЭ

| Расчетная схема УЭ | $l_{об}$ | f_0 | C | C_m | k_f |
|---|-------------------|--|-------|-------|--------|
| <p>Стержень</p>  | 1 | $\frac{0,250}{l_{об}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 0,250 | 0,160 | 0,405 |
| <p>Кольцо</p>  | $\frac{d_0^2}{h}$ | $\frac{0,492}{l_{об}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 0,492 | 0,180 | 0,148 |
| <p>Мембрана</p>  | $\frac{d^2}{h}$ | $\frac{1,968}{l_{об}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 1,968 | 0,772 | 0,153 |
| <p>Консольная балка</p>  | $\frac{l^2}{h}$ | $\frac{0,162}{l_{об}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 0,162 | 0,080 | 0,243 |
| <p>Консольная балка</p>  | $\frac{l^2}{h}$ | $\frac{0,316}{l_{об}} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ | 0,316 | 0,091 | 0,0845 |

3.3 Исследование влияния присоединенной массы на частотные характеристики упругих элементов

Моделирование собственных частот УЭ с учетом влияния присоединенной массы

Полученное ранее выражение (3.8) для расчета собственной частоты УЭ пригодно только в тех случаях, когда элементы УЭ не входят в колебательную систему УЭ, т.е. тогда, когда элементы УЭ не создают дополнительной жесткости и инерционности в направлении действия нагрузки на УЭ. Обычно датчик разрабатывается таким образом, чтобы дополнительная жесткость и инерционность были минимальны. Это практически всегда удается в отношении дополнительной жесткости, так как УЭ должен воспринимать входную величину без искажений, так как любая дополнительная жесткость снижает значение входной величины и нередко искажает характер ее действия.

Это влияние можно учесть, воспользовавшись понятием присоединенной массы как характеристики инерционности конструктивных элементов УЭ и влияющей на его собственную частоту.

Для того чтобы учесть влияние присоединенной массы необходимо найти способ ее учета. Такой способ достаточно подробно изложен в [79] и заключается в том, что реальная колебательная система (УЭ) с распределенными массой и жесткостью, заменяется некоторой эквивалентной системой, у которой эти параметры сосредоточены, а величина их выбирается таким образом, чтобы собственные частоты были равны. В этом случае предоставляется возможность суммирования отдельных параметров и по сумме их определить собственную частоту системы (УЭ с присоединенной массой).

Так как речь идет об учете присоединенной массы, то нужно сложить массу УЭ с присоединенной массой, оставляя без изменения жесткость УЭ. Другими словами, реальную колебательную систему, характеризующуюся какой-то определенной жесткостью, распределенной массой m , УЭ и присоединенной массой $m_{пр}$ заменить эквивалентной системой с той же жесткостью W УЭ, масса которого равна нулю, но в точке приложения присоединенной массы $m_{пр}$ добавляется масса, учитывающая влияние распределенной массы УЭ, и равная массе его, умноженной на коэффициент приведения k_f .

При таких условиях нетрудно аналитически определить статический прогиб УЭ и, пользуясь выражением (3.8), можно определить собственную частоту УЭ с учетом присоединенных масс.

Так, например, если УЭ выполнен в виде стержня постоянного сечения, то его статический прогиб может быть определен:

$$\delta_{cm} = \frac{Fl}{S_{cm} \cdot E}, \quad (3.9)$$

где F - сила тяжести, приложенная к стержню $F = mg$, где m - суммарная присоединенная масса, l - длина стержня; $S_{ст}$ - сечение стержня; E - модуль

упругости материала стержня.

Согласно вышепринятому $m = m_{пр} + k_f m_3$. Выразив присоединенную массу в долях от массы УЭ $m_{пр} = \alpha m_3$, определяя массу УЭ через его геометрические размеры и свойства материала, получим для статического прогиба УЭ в виде стержня постоянного сечения следующую ММ:

$$\delta = \frac{gpl(\alpha + k_f)}{E} \quad (3.10)$$

ММ собственной частоты такого элемента, исходя из (3.8), будет

$$f_{cm} = \frac{0,160}{l \cdot \sqrt{\alpha + k}} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3.11)$$

где α - отношение присоединенной массы к массе УЭ; k - коэффициент приведения массы УЭ; E - модуль упругости материала УЭ; ρ - плотность материала УЭ.

В выражении (3.11) все величины известны, кроме коэффициента приведения массы. Величина этого коэффициента определяется из совместного решения выражений (3.11) при $\alpha = 0$ и (3.5), так как в соответствии с принятым ранее условием собственные частоты упругих элементов должны быть равными.

Поэтому для стержневого УЭ коэффициент приведения массы определяется из ММ

$$\frac{0,249}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{0,160}{l \sqrt{k_f}} \quad (3.12)$$

откуда, поставив числовые значения, получаем $k_f = \left(\frac{0,160}{0,240} \right)^2 = 0,405$

Учитывая значение k_f ММ (3.11) можно записать в следующем виде

$$f_{cm} = f_0 \sqrt{\frac{k_f}{k_f + \alpha}} \quad (3.13)$$

Проведенные исследования других типов упругих элементов показывают, что ММ (3.13) справедлива практически для любого УЭ.

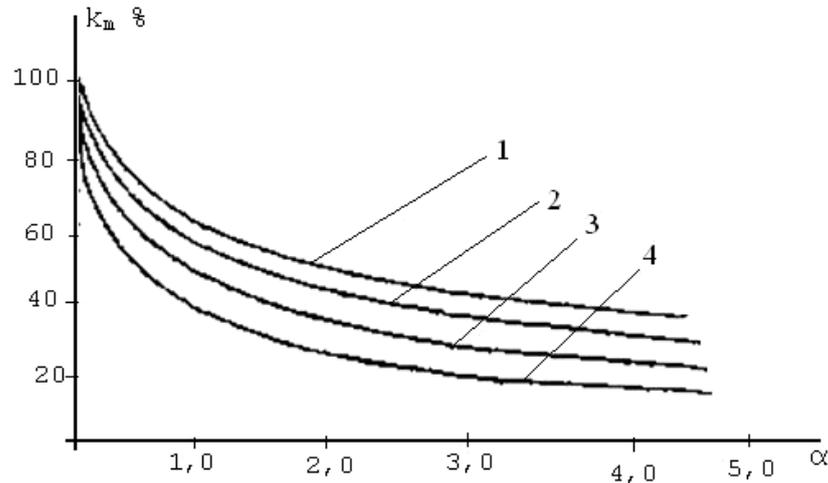
Аналогичным образом определенные коэффициенты приведения массы для других конструкций УЭ, которые были ранее приведены в таблице 3.1.

Анализ ММ типа (3.13) показывает, что присоединенная масса существенно снижает собственную частоту УЭ. Причем, чем больше отношение присоединенной массы к массе УЭ, тем больше это снижение.

На рисунке 3.9 представлены графические модели, характеризующие

снижение собственной частоты от относительной величины присоединенной массы. По оси ординат отложена относительная собственная частота, вычисленная с использованием выражений (3.11) и (3.13)

$$k_m = \frac{f_{0m}}{f_0} = \frac{0,640}{\sqrt{\alpha + 0,405}} = \sqrt{\frac{0,405}{\alpha + 0,405}}$$



1 – стержень; 2 - балка равного сечения; 3 - мембрана (кольцо); 4 - балка равного сопротивления

Рисунок 3.9 - Характеристика влияния присоединенной массы на собственную частоту УЭ

Из анализа графиков на рисунке 3.9, можно понять, что коэффициент приведения массы оказывает значительное влияние на собственную частоту УЭ, особенно для стержневых УЭ.

Особенности расчета собственной частоты пьезоэлектрических измерительных преобразователей

Пьезоэлектрические УЭ (ПЭИП) в своем составе не имеют таких преобразователей, как другие УЭ, в частности, у них отсутствует собственно УЭ, функции которого выполняет сам пьезоэлемент [80, 81]. Динамические свойства его определяются собственной частотой колебаний ЧЭ, включающего в себя некоторые конструктивные элементы ИП. Особенности расчета собственной частоты таких УЭ проиллюстрируем на примере ПЭИП пульсаций давления, как УЭ имеющего наиболее сложную и показательную конструкцию ЧЭ [81, с. 80].

Анализ конструкции ПЭИП и ЧЭ показывает, что он обладает существенной по величине присоединенной массой, и его расчетную схему можно представить в виде конструктивной модели (рисунок 3.10).

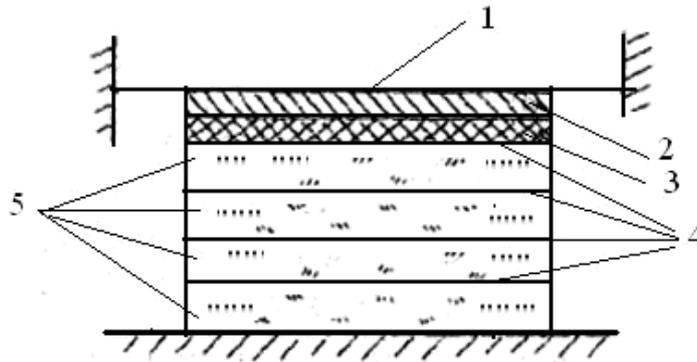


Рисунок 3.10 - Конструктивная модель пьезоэлектрического ЧЭ датчика пульсаций давления

Из этой схемы видно, что столбик из 4 пьезоэлементов 5 может быть назван ЧЭ - элементом, определяющим частотные свойства датчика. Остальные элементы (мембрана 1, опора-диск 2, изолятор 3 и токосъемник 4) нагружают столбик дополнительной (присоединенной) массой.

Поскольку столбик по форме может быть принят за УЭ стержневого типа, то его собственная частота рассчитывается по ММ (3.5), в которой $l=4h_{\text{чэ}}$. Пьезоэлементы в датчике выполнены из кварца толщиной $h_{\text{чэ}} = 0,5$ мм в виде квадратных пластин со стороной $a = 3,5$ мм и удельным весом $\rho = 2,21 \cdot 10^3$ кг/м³. Тогда численная ММ для собственной частоты ЧЭ:

$$f_0 = \frac{0,249}{4h_{\text{чэ}}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \frac{0,249}{4 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} \sqrt{\frac{0,8 \cdot 10^{14}}{2,21 \cdot 10^3}} = 751 \text{ кГц},$$

а его масса: $m = 4a^2 h_{\text{пэ}} \rho = 4(3,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2,21 \cdot 10^3 = 54,2 \cdot 10^{-6}$ кг.

Из анализа конструктивной модели ЧЭ видно, что присоединенная масса складывается из массы диска, изолятора и частей массы мембраны и токосъемника:

$$m_{\text{пэ}} = m_{\text{д}} + m_{\text{и}} + k_{\text{м}} m_{\text{м}} + k_{\text{т}} m_{\text{т}}$$

где $m_{\text{д}}$, $m_{\text{и}}$, $m_{\text{м}}$, $m_{\text{т}}$ - масса диска, изолятора, мембраны и токосъемника соответственно.

Диск выполнен из стали ХН67МБЮ ($\rho_{\text{д}} = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³) диаметром $d_{\text{д}} = 4,4$ мм и толщиной $h_{\text{д}} = 1$ мм, поэтому его масса (кг)

$$m_{\text{д}} = \frac{\pi d_{\text{д}}^2 h_{\text{д}}}{4} \rho_{\text{д}} = \frac{\pi (4,4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 118 \cdot 10^{-6}$$

Изолятор выполнен в виде диска $d_{\text{и}} = 4,4$ мм, толщиной $h_{\text{и}} = 0,5$ мм из керамики ВК-94. Значение плотности этой керамики может быть принято из

сопоставления плотностей стекла [$\rho = (2,4-2,8) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$], мрамора [$\rho = (2,60-2,84) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$] и кварца плавленного [$\rho = 2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$].

Принимаем для расчета плотность керамики $\rho = 2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Тогда масса изолятора (кг):

$$m_{II} = \frac{\pi d_{II}^2 h_{II}}{4} \rho_{II} = \frac{\pi (4,4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 2,6 \cdot 10^3 = 19,8 \cdot 10^{-6}$$

Мембрана - это пластина круглой формы диаметром $d_M = 5,2 \text{ мм}$ и толщиной $h_M = 0,3 \text{ мм}$ из стали ХН67МБЮ ($\rho_M = 7,8 \text{ кг/м}^3$), поэтому ее масса (кг):

$$m_M = \frac{\pi d_M^2 h_M}{4} \rho_M = \frac{\pi (5,2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 49,7 \cdot 10^{-6}$$

Токосъемники выполнены тоже в виде дисков диаметром $d_T = 3,5 \text{ мм}$ и толщиной $h_T = 0,02 \text{ мм}$ из ленты, плотность материала (79 НМ) которой может быть принята равной плотности стали ($\rho_T = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$).

Тогда масса токосъемника (кг):

$$m_T = \frac{\pi d_T^2 h_T}{4} \rho_T = \frac{\pi (3,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,02 \cdot 10^{-3}}{4} \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 1,5 \cdot 10^{-6}$$

Так как мембрана - это жестко заземленная тонкая пластина, то для нее коэффициент формы (k_{FM}) = 0,153 [81, с. 212]. Поиск величины k_{FT} можно осуществить из анализа расчетной схемы, из которой видно, что второй токосъемник (считая от мембраны) нагружает массой только три (из четырех) пьезоэлемента, третий - два пьезоэлемента, четвертый - один. Поэтому $k_{FT} = 2,5$.

Воспользовавшись ранее приведенной формулой для расчета присоединенной массы, получим

$$m_{пр} = 118 \cdot 10^{-6} + 19,8 \cdot 10^{-6} + 0,153 \cdot 49,7 \cdot 10^{-6} + 2,5 \cdot 1,50 \cdot 10^{-6} = 149 \cdot 10^{-6} \text{ кг}$$

Видно, что присоединенная масса действительно значительно превышает

$$\alpha = \frac{m_{пр}}{m_{нэ}} = \frac{149 \cdot 10^{-6}}{54,2 \cdot 10^{-6}} = 2,75$$

массу столбика поэтому собственная частота УЭ должна рассчитываться по формуле (3.11): $f_{узм} = f_0 \sqrt{\frac{k_f}{k_f + \alpha}}$ где $k_f = 0,405$ - коэффициент приведения массы для стержневого ЧЭ. Подставив расчетные значения параметров, получаем:

$$f_{изм} = 751 \sqrt{\frac{0,405}{0,405 + 2,75}} = 269 \text{ кГц}$$

Рассчитанное значение собственной частоты ПЭИП типа ДПС мало (не более чем на 10%) отличается от экспериментально определенного, что свидетельствует о правильно выбранной методике и проведения расчета.

Методика расчета, заключается в разработке расчетной схемы ИП; определении конструктивного исполнения и типа ЧЭ; в установлении конструктивных элементов, нагружающих ЧЭ массой; в разработке конструктивной связи массы элементов между собой и ЧЭ, расчете масс ЧЭ и присоединенной массы; расчете собственных частот по формулам (3.8) и (3.13) и может быть рекомендована для расчета собственной частоты ПЭИП.

3.4 Исследование метрологических характеристик УЭ измерительных преобразователей

К основным метрологическим характеристикам УЭ относят [65, с. 19; 82]:

- частотный диапазон работы;
- быстродействие;
- диапазон измерения информативного параметра;
- диапазон рабочих температур;
- основная погрешность;
- надежность.

Расчеты частотного диапазона работы УЭ

Частотный диапазон работы УЭ - область значений частот изменения измеряемого параметра, в пределах которой обеспечивается заданная неравномерность частотной характеристики и нормируется основная погрешность датчика. Поэтому он характеризуется нижней и верхней граничными частотами, в интервале между которыми погрешность УЭ не превышает заданной.

Нижняя граничная частота УЭ очень часто равняется нулю или задается нормативно-технической документацией на УЭ, когда ее значение обеспечивается последующим трактом преобразования выходного сигнала датчика. Расчет верхней граничной частоты проводится с использованием ММ, описывающей АЧХ.

Амплитудно-частотная погрешность (рисунки 3.7 и 3.8) может быть представлена:

$$\gamma_f = M - 1 \tag{3.14}$$

Подстановка в (3.14) величины М из (2.1) и решение, проведенное в [65, с. 53] для $f \ll f_0$ дают

$$\gamma_f = (1 - 2\beta^2) \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \tag{3.15}$$

Если амплитудно-частотная погрешность задана, и в частотном диапазоне работы она не превышает величину γ_{fd} то, как видно на рисунка 3.7, $f=f_{гр}$ тогда (3.15) можно представить в следующем виде

$$\gamma_{fd} = (1 - 2\beta^2) \cdot \left(\frac{f_{zp}}{f_0} \right)^2 \quad (3.16)$$

Поэтому верхняя граничная частота

$$f_{zp} = f_0 \sqrt{\frac{\gamma_{fd}}{1 - 2\beta^2}} \quad (3.17)$$

Из (3.17) следует, что увеличение верхней граничной частоты при заданной величине АЧХ можно осуществлять увеличением степени успокоения, что практически используется в некоторых типах УЭ (например, в акселерометрах). Теоретически наибольшая величина верхней граничной частоты обеспечивается при $\beta=0,707$. Однако, практически стремятся получить $\beta \approx 0,6$, т.к. это дает еще некоторое увеличение $f_{гр}$ за счет того, что появляется положительная амплитудно-частотная погрешность, но не превышающая допустимой.

Как отмечалось ранее, в большинстве случаев демпфирование в УЭ не вводится и степень успокоения в них очень мала ($\beta \ll 1$). Поэтому для большинства УЭ верхнюю граничную частоту можно рассчитать по формуле

$$f_{zp} = f_0 \sqrt{f_{fd}} \quad (3.18)$$

Из (3.18) видно, что расширение частотного диапазона работы УЭ (увеличение верхней граничной частоты) возможно только за счет обеспечения максимальной частоты собственных колебаний УЭ и снижения его точностных свойств.

Оценка быстродействия измерительных преобразователей

ДФВ в подавляющем большинстве являются аналоговыми, и в случае применения их в системах с частотными или дискретными сигналами возникают затруднения, вызванные необходимостью частотного согласования УЭ со всеми элементами системы. Другими словами, система управления, измерения или контроля, построенная оптимальной по быстродействию, должна состоять из элементов, которые характеризуются быстродействием, отвечающим необходимым требованиям. В связи с этим появляется задача оценки быстродействия УЭ ИП с аналоговым выходным сигналом [65, с. 90].

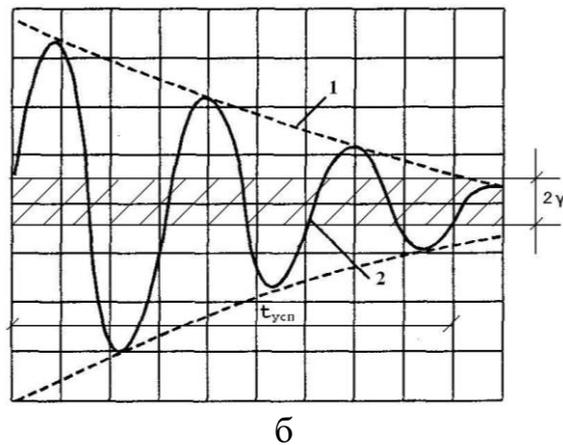
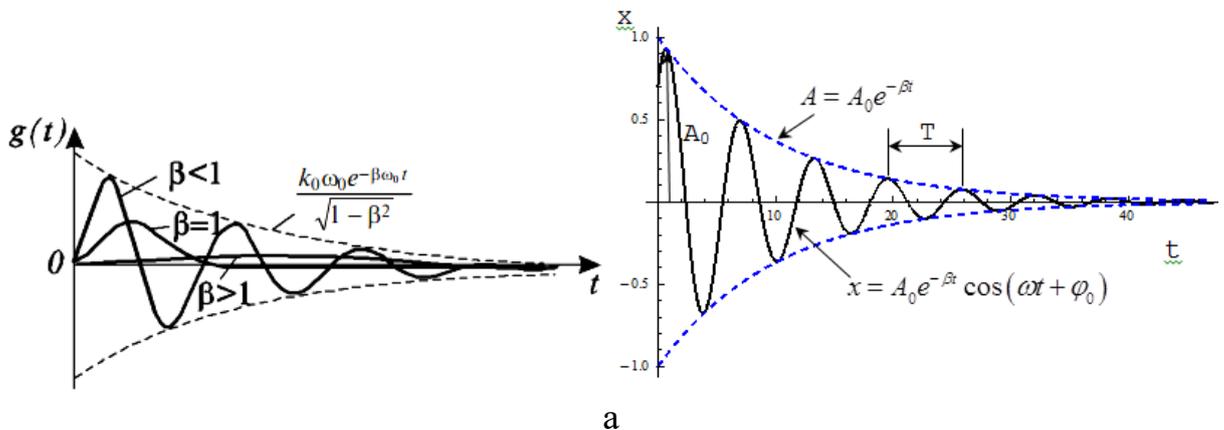
Решение этой задачи применительно к УЭ механических величин упрощается в связи с тем, что УЭ, как правило, можно рассматривать в виде колебательной системы с одной степенью свободы (рисунок 3.6). Процесс

затухания колебаний, возникающий при соответствующем приложении нагрузки к датчику, может быть представлен графической моделью (рисунок 3.11). Огибающая этого колебательного описывается ММ [83]:

$$y(t) = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot e^{-\beta\omega_0 t}, \quad (3.19)$$

где $y(t)$ - выходная величина УЭ соответствующая амплитуде свободных колебаний; ω_0 - собственная круговая частота; β - степень успокоения, t - текущее время.

По сути говоря (3.19), является ММ колебательного звена второго порядка [62, с. 291], работающего в режиме затухания (рисунок 3.11).



а – графики колебаний УЭ с различными степенями затухания; б - осциллограмма затухающих колебаний УЭ

Рисунок 3.11 - Математические модели затухающих колебательных процессов в УЭ ИП

Математические модели огибающей 1 и самого затухающего колебательного процесса 2 (рисунок 3.11, б) могут быть представлены:

$$\text{Кривая 1} - \frac{F_{\max} \exp(-r\omega_0 t)}{C_{\dot{y}} \sqrt{1-r^2}}; \quad (3.20)$$

$$\text{Кривая 2} - \sin \omega_0 t \sqrt{1-r^2} \quad (3.21)$$

Из рисунка 3.11,б видно, что амплитуда затухающих колебаний в момент времени $t_{\text{уст}}$ становится меньше погрешности γ ИП. Другими словами, с момента времени $t_{\text{уст}}$ амплитуда колебаний чувствительного элемента УЭ находится в полосе погрешности и её величина всегда меньше, чем его погрешность. Поэтому $t_{\text{уст}}$ - это время, в течение которого датчик неверно воспроизводит изменяющуюся во времени выходную величину. Если последняя изменяется дискретно, то правильно преобразованное значение ее на выходе УЭ может быть получено не раньше, чем через $t_{\text{уст}}$.

Для расчета быстродействия УЭ положим в ММ (3.19) $y(t) = \gamma$, $t = t_{\text{уст}}$ и прологарифмируем его: $\ln \gamma = -\beta\omega_0 - \ln \sqrt{1-\beta^2}$

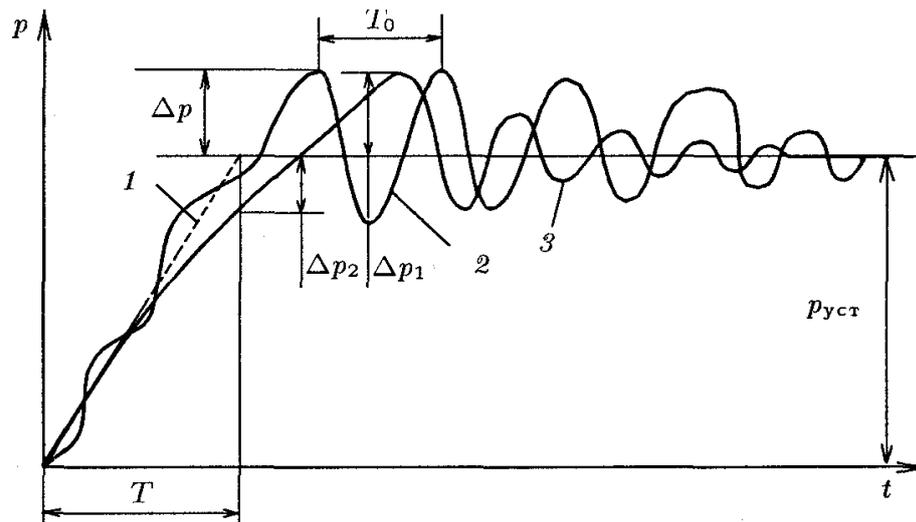
$$t_{\text{уст}} = -\frac{\ln(\gamma\sqrt{1-\beta^2})}{\beta\omega_0} = -\frac{\ln(\gamma\sqrt{1-\beta^2})}{2\pi f_0 \beta} \quad (3.22)$$

Следовательно, быстродействие

$$N = -\frac{2\pi f_0 \beta}{\ln(\gamma\sqrt{1-\beta^2})} \quad (3.23)$$

Выражение (3.23) устанавливает количественные соотношения между быстродействием, с одной стороны, и собственной частотой, погрешностью и степенью успокоения, с другой. Видно, что, пока степень успокоения мала, быстродействие УЭ растет прямо пропорционально степени успокоения.

И, последнее, наглядно и информативно о динамических свойствах УЭ и всего ИП, можно судить по виду и характеристикам переходного процесса при подаче резкого скачка давления на УЭ (рисунок 3.12) [4, с. 25].



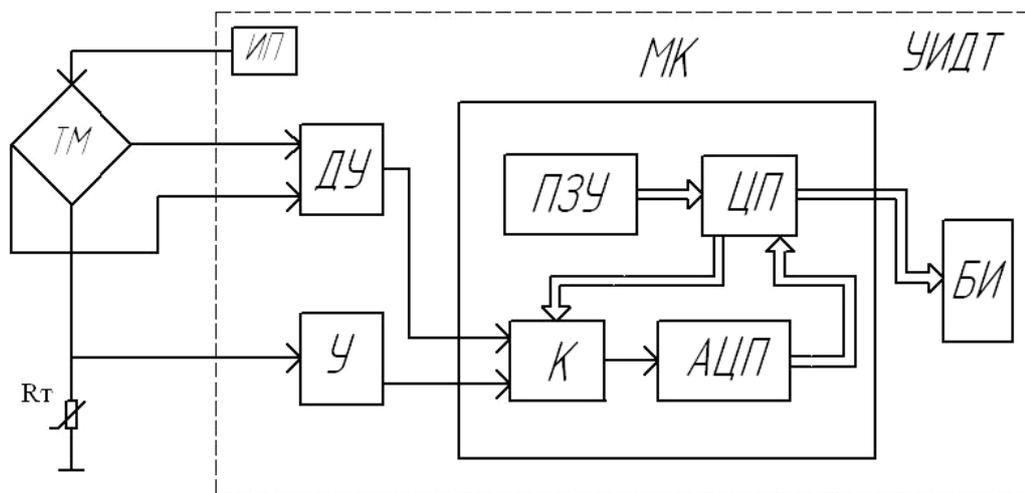
- 1 - идеализированный;
 2 - реальный переходной процесс без демпфирования; 3 - реальный слабо демпфированный переходной процесс

Рисунок 3.12 - Переходной процесс изменения давлений

3.5. Разработка аналитических и численных моделей элементов ИП

В структуру ДДТ в микроэлектронном исполнении, как ранее было отмечено, входят различные микромеханические и электронные узлы, математические модели которых разрабатываются на основе различных областей математики, физики, электротехники, механики, квалиметрии, при этом используются отличные друг от друга математические аппараты и теории, часто несовместимые [84, 85]. Поэтому при математическом моделировании элементов и структур датчиков используется уровневый подход, исходя из иерархической структуры самих датчиков [86, 87].

В качестве примера на рисунке 3.13 изображена структурная схема МЭД давления и температуры, включающей собственно ДДТ (T_M и R_T) и электронный блок (УИД). И, если, для элементов и узлов электронного блока существуют ММ, использующие различные программы (Micro-Cap и LabVIEW), то для элементов датчика (УЭ, тензомост, ТЧЭ) наиболее простыми и доступными являются инженерные модели, поэтому рассмотрим именно их.



ТМ – тензомост, ДУ – дифференциальный усилитель, У – усилитель, ПЗУ – постоянное запоминающее устройство, МК – микроконтроллер, ЦП – центральный процессор, К – коммутатор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, БИ – блок индикации, ИП – источник питания, R_т – терморезистор, УИДТ – устройство измерения давления и температуры
 Рисунок 3.13. Структурная схема МЭД давления и температуры

Моделирование кремниевого УЭ МЭД давления и температуры

В результате моделирования должны быть получены геометрические параметры УЭ, а также будет определено выполнение условия гарантированного обеспечения прочности ИП [88].

Процесс моделирования может быть представлен в виде алгоритма – рисунок 3.14, при этом исходная расчетная модель УЭ в виде профилированной мембраны приведена на рисунке 3.15.

Кроме того, алгоритм и листинг программы расчета профилированного полупроводникового ЧЭ представлены в приложении.

При моделировании все количественные данные по характеристикам кремния были использованы из фундаментального справочника [89], а расчетные формулы из [90, 91].

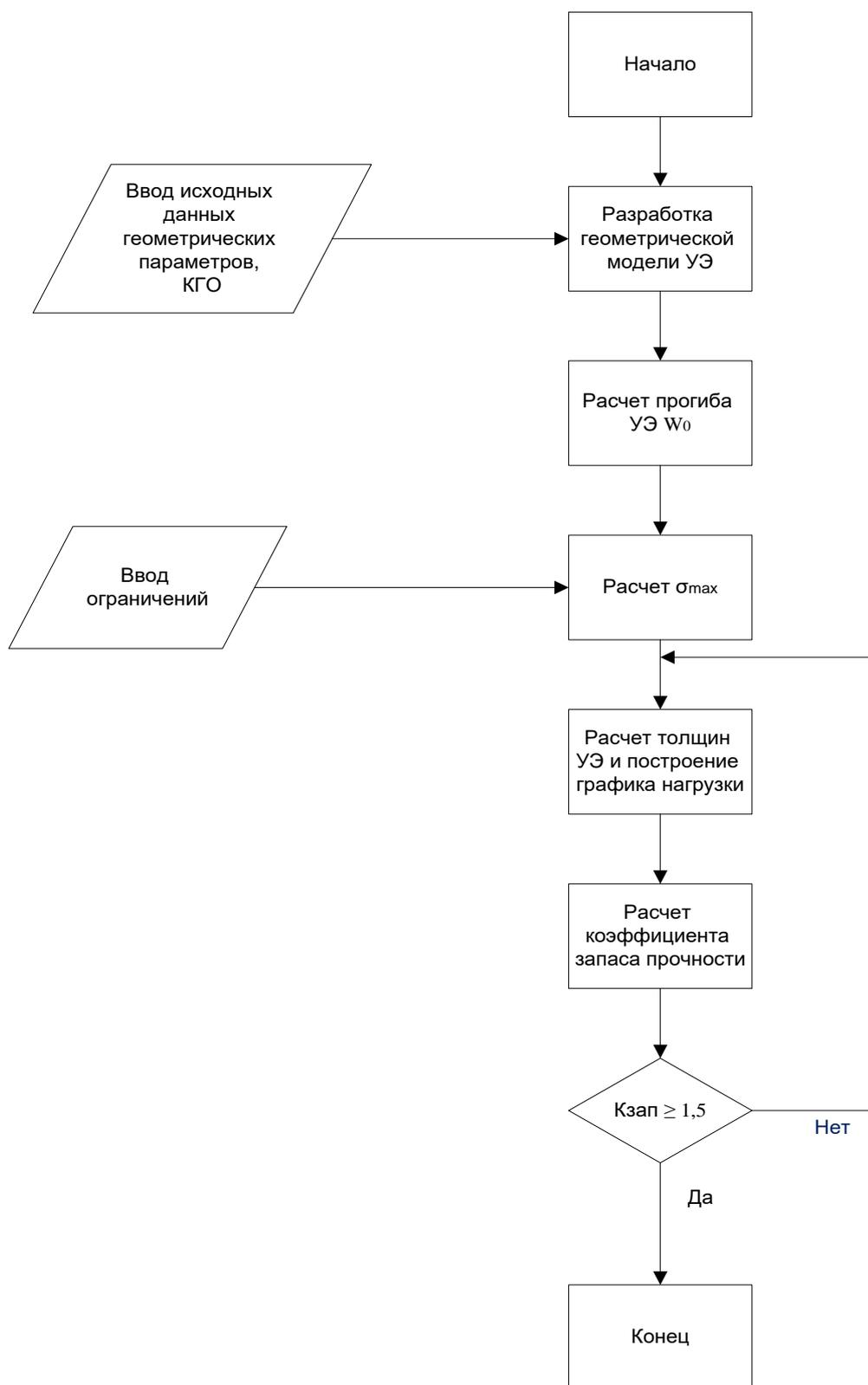


Рисунок 3.14 - Алгоритм моделирования (прочностная модель) расчета кремниевого УЭ

Последовательность прочностного расчета может быть представлена следующими этапами:

1. Расчет прогиба УЭ в центре плоской части:

$$W_0 = 0,131 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{R^4}{h^3} \cdot q, \quad (3.24)$$

где $R=a/2$ - рабочий радиус мембраны, мм; h - толщина мембраны, мм; q - распределенное давление, Па.

Отметим, что края мембраны жестко закреплены, диаметр мембраны во много раз превышает ее толщину ($2a \gg h$). Отсюда следует, что прогибы мембраны незначительны и не превышают 20 % от ее толщины.

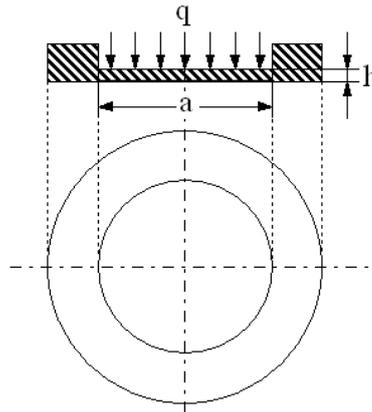


Рисунок 3.15 - Конструктивная модель полупроводникового профилированного УЭ

2. Расчет механических напряжений в УЭ

Для нахождения толщины мембраны необходимо найти максимальное значение напряжения, которое возникает на окружности мембраны $r = R$ в направлении радиуса. Максимальное значение напряжение можно определить:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{r, \max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{PR^2}{h^2}, \quad (3.25)$$

где $R = 2$ мм, P - приложенное давление.

Выразим из формулы (3.25) толщину h :

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\max}}}, \quad (3.26)$$

Определим максимальное значение σ_{\max} :

$$\sigma_{\max} = E_{\min} \cdot \varepsilon_{\max}, \quad (3.27)$$

где $E_{\min} = 1,3 \cdot 10^{11}$ Н/м² - модуль Юнга для кремния, $\varepsilon_{\max} = 5 \cdot 10^{-4}$ - максимальная деформация рабочей зоны плоской части УЭ.

Подставляя значения модуля Юнга и максимальной деформации в выражение (3.27) для максимального значения напряжения получим:

$$\sigma_{\max} = 1,3 \cdot 10^{11} \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 65 \text{ МПа.}$$

3. Расчет толщины УЭ из условий прочности.

Полученное значение σ_{\max} подставляем в (3.26) и рассчитываем значения толщины h :

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6}{65 \cdot 10^6}} = 214 \text{ мкм.}$$

По рассчитанной аналитической нелинейной модели (3.26), была получена графическая модель (рисунок 3.16), по которой можно спрогнозировать механическую прочность профилированного кремниевого УЭ ДДТ. На графике также показана экспонента, аппроксимирующая зависимость $h_x = f(P_x)$.

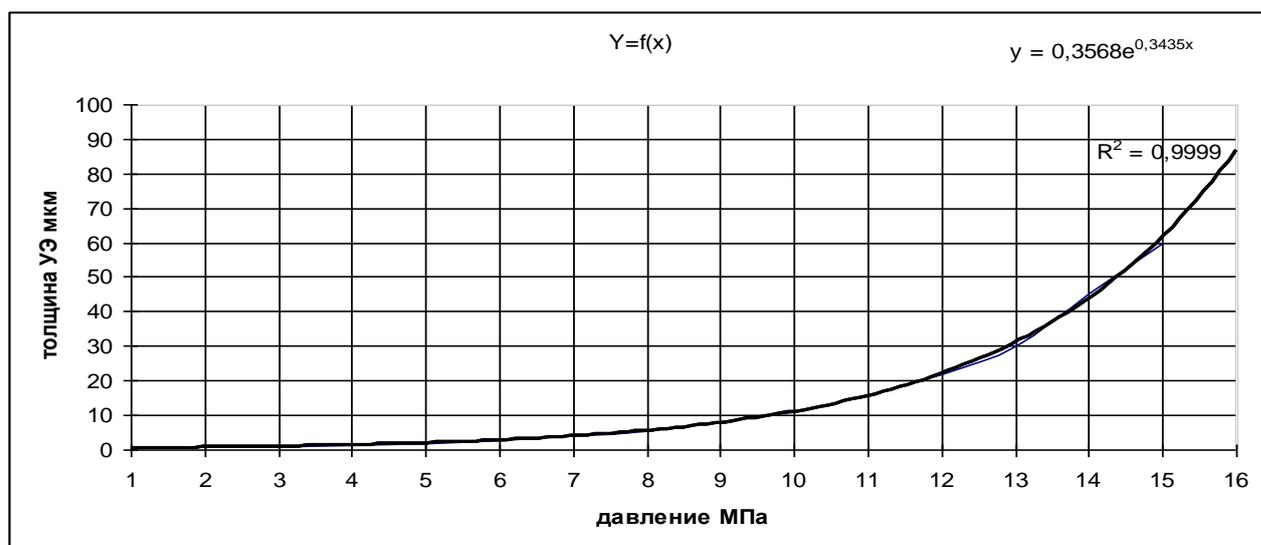


Рисунок 3.16 - Графическая модель зависимости толщины профилированного кремниевого УЭ от давления

Проверка условий обеспечения механической надежности

Окончательная оценка механической надежности работы УЭ и всего ДДТ в целом, может быть получена по интегральному критерию, принятому в приборостроении – по коэффициенту запаса прочности [92, 93]:

$$K_{\text{зап}} = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{мах}}} = \frac{\varepsilon_{\text{пред}}}{\varepsilon_{\text{мах}}}, \quad (3.28)$$

где $\sigma_{пред}$ и $\epsilon_{пред}$ – соответственно максимально допустимые значения напряжения и деформации для кремния.

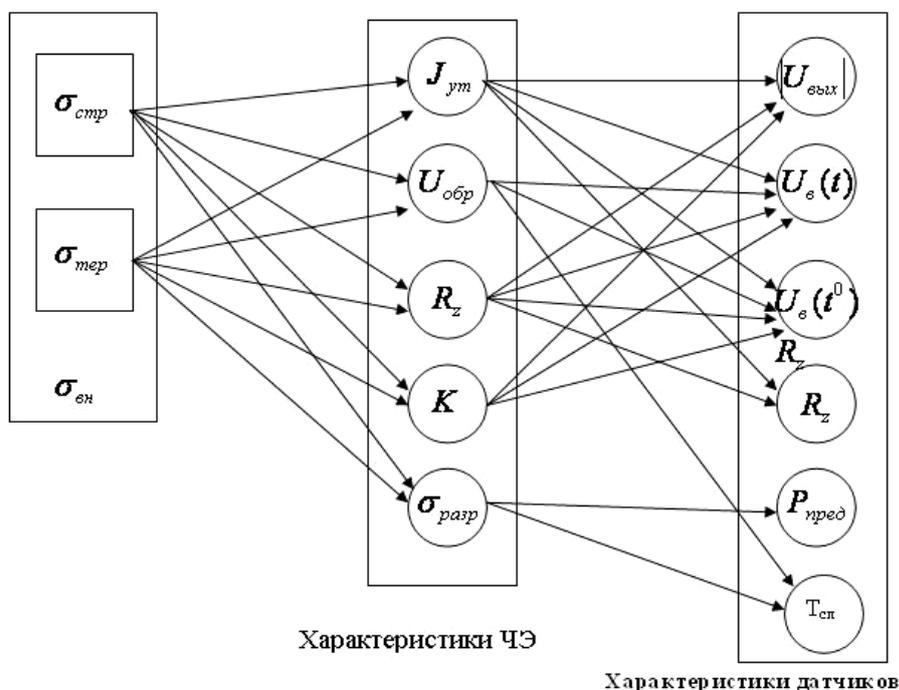
Параметры кремниевого датчика зависят от геометрической формы чувствительного элемента и расположения измерительных элементов.

3.6. Учет и моделирование влияния механических напряжений на характеристики ЧЭ и ИМ и ДФВ

Как известно, основными влияющими факторами для ЧЭ и ИМ являются температура и механические напряжения (МН) [94]. Под действием паразитных механических деформаций все элементы и структуры ЧЭ и ИМ в той или иной мере изменяют свои электрофизические характеристики (ЭФХ), при этом эти изменения маскируются под информативные параметры [95]. В частности, действие МН могут проявляться следующим образом:

- деформируются обратные ветви вольтамперных характеристик изолирующих “р–п” переходов;
- увеличиваются токи утечки диффузионных сенсорных структур;
- снижаются пробивные напряжения;
- уменьшается пьезочувствительность;
- увеличивается шумовая составляющая выходного сигнала;
- деформируются тонкие перемычки упругих элементов;
- наблюдается дрейф ЭФХ.

На рисунке 3.17 показан граф влияния структурных и температурных напряжений на основные ЭФХ ЧЭ и датчиков.



σ_{vn} - $\sigma_{стр}$ механические напряжения; $J_{ут}$ - $\sigma_{разр}$ – характеристики ЧЭ; $U_{вых}$ - $P_{пред}$ - $T_{сл}$ – характеристики датчиков

Рисунок 3.17 - Граф влияния МН на характеристики ЧЭ и ДФВ

В связи с этим, для обеспечения стабильности датчиков, необходимо уменьшить влияние МН на электрофизические характеристики элементов и структур МЭД. Одним из эффективных методов уменьшения уровня МН в ЧЭ является их компенсация с помощью пленок и пленочных композиций, предложенного в [96]. Рассмотрим моделирование таких компенсаторов.

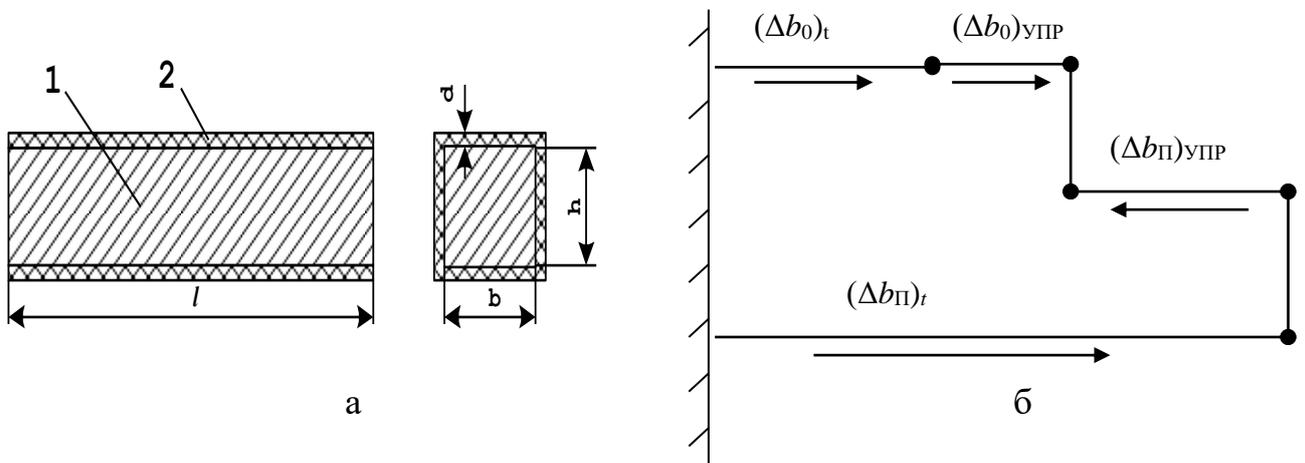
Чувствительные участки ПЧЭ можно представить в виде тонких пластин, заделанных с концов, поэтому в качестве исходной модели компенсатора рассмотрим тонкую прямоугольную пластину из кремния, покрытую металлической или диэлектрической пленкой (рисунок 3.18, а). ММ пленочного термокомпенсатора можно получить, исходя из диаграммы терморасширения пластины с пленочным покрытием, изображенной на рисунке 3.18, б.

Из расчетной модели (рисунок 3.18, б) следует:

$$\Delta b_0 = (\Delta b_0)_t \pm (\Delta b_0)_{УПР} = b\alpha_0 \cdot \Delta t \pm C_0 \cdot N; \quad (3.29)$$

$$\Delta b_{П} = (\Delta b_{П})_t \pm (\Delta b_{П})_{УПР} = b\alpha_{П} \cdot \Delta t \pm C_{П} \cdot N; \quad (3.30)$$

где Δb_t , $\Delta b_{УПР}$ – составляющие суммарного удлинения (Δb_0) от действия температуры и сил упругости; C – податливость; N – сила взаимодействия между пластиной и покрытием; α – КТР; Δt – приращение температуры; индексы «О» и «П» относятся соответственно к пластине и покрытию.



1 – пластина; 2 – покрытие
а - пленочного компенсатора; б - его размерная цепь
Рисунок 3.18 - Исходная геометрическая модель

Из условия неразрывности системы пластина–покрытие следует:

$$\Delta b_0 = \Delta b_{П} = \Delta b_{ОП} \quad (3.31)$$

$$\Delta b_{ОП} = b \cdot \alpha_{ОП} \cdot \Delta t, \quad (3.32)$$

откуда

$$\alpha_{оп} = \Delta b_{оп} / b \cdot \Delta t . \quad (3.33)$$

Из выражений (3.32) и (3.33) можно определить N и $\Delta b_{оп}$:

$$N = \frac{b \alpha_{п} \cdot \Delta t - \Delta b_{п}}{C_{п}} ; \quad (3.34)$$

$$\Delta b_{оп} = \frac{l(\alpha_0 C_{п} + \alpha_{п} C_0) \Delta t}{C_{п} + C_0} . \quad (3.35)$$

Подставляя (3.35) в (3.33), получаем:

$$\alpha_{оп} = \frac{\alpha_0 C_{п} + \alpha_{п} C_0}{C_{п} + C_0} . \quad (3.36)$$

Для пластины справедливы соотношения:

$$C_0 = \frac{b}{E_0 F_0} ; \quad C_{п} = \frac{b}{E_{п} F_{п}} . \quad (3.37)$$

Подставляя их в (3.35), получаем:

$$\alpha_{оп} = \frac{\alpha_0 E_0 F_0 + \alpha_{п} E_{п} F_{п}}{E_0 F_0 + E_{п} F_{п}} = \frac{\alpha_0 + \alpha_{п} \frac{E_{п} F_{п}}{E_0 F_0}}{1 + \frac{E_{п} F_{п}}{E_0 F_0}} = \frac{\alpha_0 + k \alpha_{п}}{1 + k} = \alpha_0 \frac{1 + k \frac{\alpha_{п}}{\alpha_0}}{1 + k} = \alpha_0 \frac{1 + kL}{1 + k} , \quad (3.38)$$

где k, L – конструктивные коэффициенты.

Введя обозначение $\alpha_{оп} / \alpha_0 = D$ выражение (3.38) можно представить:

$$D = \frac{1 + kL}{1 + k} . \quad (3.39)$$

Выражения (3.38) и (3.39) представляют собой математическую модель системы - УЭ–пленочный компенсатор. Анализ модели (3.39) можно провести, построив ряд кривых $D=F(L)$ в координатах D и L для разных значений k (рисунок 3.19).

Для построения численной модели приняты следующие значения для переменных [97]:

- материал пластины: моно-Si ($\alpha_0=3,5 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, $E_0=1,6 \cdot 10^5$ МПа);
- размеры пластины: $a \times b=50\text{мм} \times 5\text{мкм}$;

- покрытие – алюминиевая пленка толщиной 2 мкм ($\alpha_{\text{П}}=24 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, $E_{\text{П}}=71 \text{ кН/мм}^2$, $F_{\text{П}}=10^{-8} \text{ мм}^2$).

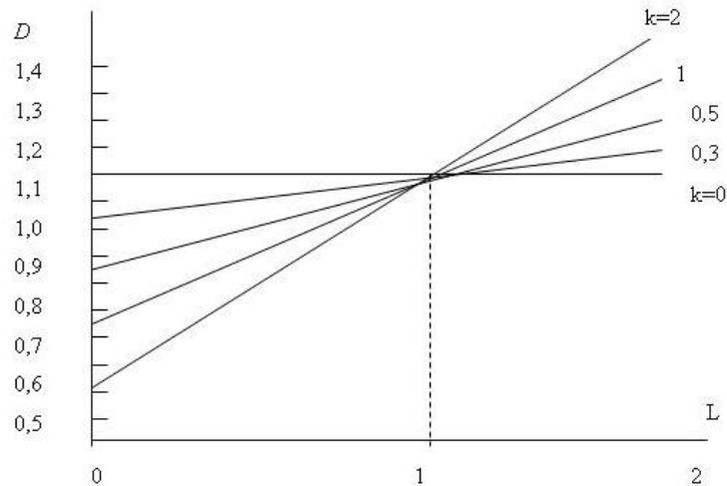


Рисунок 3.19 - Зависимость линейного расширения пластины с пленочным покрытием от соотношения физико-механических свойств материалов пластины и покрытия

После подстановки приведенных значений в выражение (3.39) получаем $\alpha_{\text{ОП}}=2,4 \cdot 10^{-9} 1/^{\circ}\text{C}$, то есть ТКЛР рассматриваемой пластины после нанесения покрытия (алюминия) уменьшается с $3,5 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ до $2,4 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$.

Аналогично для никеля толщиной 2 мкм, $\alpha_{\text{П}}=12,5 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, $E_{\text{П}}=2 \cdot 10^4 \text{ кН/мм}^2$ и тех же размеров ПЧЭ, получают $\alpha_{\text{ОП}}=3,5 \cdot 10^{-10} 1/^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, в композиционной структуре полупроводник-пленка после нанесения компенсирующих пленочных покрытий достигается уменьшение температурных МН не менее чем на порядок.

3.7 Анализ и синтез структурных моделей многозвенных измерительных преобразователей

При разработке метрологических моделей датчиков физических величин (ДФВ), следует учитывать не только вклад отдельных узлов и блоков в общую погрешность преобразования, но и иметь возможность управления метрологическими характеристиками для повышения информативности всего измерительного канала [98]. Как правило, хотя основную долю в общей погрешности преобразования ДФВ вносит ЧЭ и измерительный модуль, некоторые узлы датчика также вносят в общую погрешность свою долю. Это особенно заметно при экстремальных условиях работы датчиков. Кроме того, и сами измерительные модули могут иметь сложную конструктивную структуру, включающую несколько преобразователей или функциональных узлов, включенных последовательно (рисунок. 3.20). При этом и ЧЭ могут содержать несколько сенсорных элементов и структур, объединенных конструктивно и функционально [99]. В любом из перечисленных случаев, дополнительные узлы и преобразователи, участвующие в процессе приема, преобразования и выдачи

измерительной информации, вносят свою, индивидуальную погрешность в общую погрешность преобразования измерительного канала [100].

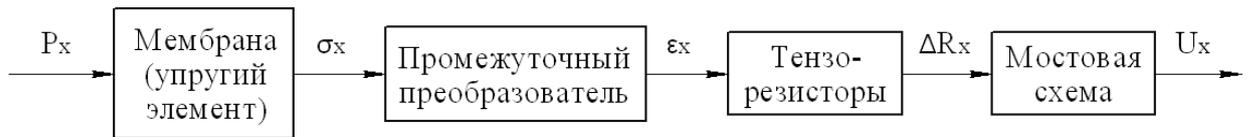


Рисунок 3.20 - Структурно-функциональная модель тензорезисторного датчика давления

Анализ как отдельных, так и общих погрешностей многозвенных измерительных структур удобно и наглядно проводить, используя совмещенную модель, на которой приведены структурные блоки и их функции преобразования (рисунок 3.21) [101]. В результате учета и суммирования погрешностей отдельных звеньев измерительной цепи получают метрологическую модель всего измерительного преобразователя.

Таким образом, метрологическая модель (МТМ) датчика, являющейся разновидностью математических моделей (ММ), строится с использованием аппарата метрологического анализа и основывается на структурной и функциональной моделях датчика. МТМ позволяет установить связи между погрешностями датчика в целом и погрешностями его отдельных компонентов.

Построение МТМ цепи из линейных звеньев начинается с рассмотрения структурной схемы датчика (структурной функциональной модели). В частности, на рисунке 3.21 приведены два последовательно включенных звеньев, имеющих номинальные функции преобразования $y_1 = S_1 x_1$ и $y_2 = S_2 x_2$.

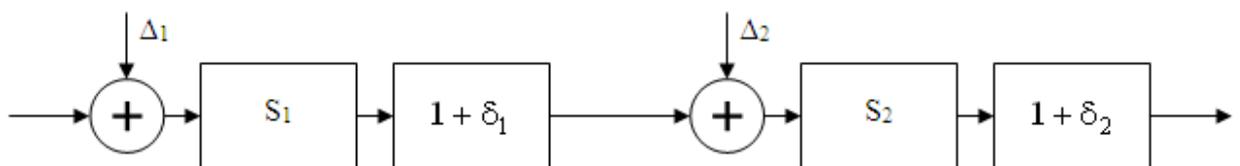


Рисунок 3.21 - Метрологическая модель двухзвенной измерительной цепи

Принимая выходную величину первого звена равной выходной величине второго звена, т.е. $y_1 = x_2$, получим:

$$y_2 = S_2(x_2) = S_2(y_1) = S_2(S_1 x_1) = S_1 S_2 x_1. \quad (3.40)$$

Опуская индексы у входных и выходных величин, получаем общую номинальную функцию преобразования:

$$y = S_1 S_2 x. \quad (3.41)$$

Реальные функции преобразования звеньев можно представить в виде:

$$y_1 = S_1(1 + \delta_1)(x_1 + \Delta_1), \quad y_2 = S_2(1 + \delta_2)(x_2 + \Delta_2) \quad (3.42)$$

Согласно принципу суперпозиции, реальная выходная величина y_p будет состоять из трех слагаемых, по числу входов на модели x , Δ_1 , Δ_2 :

$$\begin{aligned} y_p &= xS_1(1 + \delta_1)(x_1 + \Delta_1)S_2(1 + \delta_2) + \Delta_1S_1(1 + \delta_1)(x_1 + \Delta_1)S_2(1 + \delta_2) + \Delta_2S_2(1 + \delta_2) = \\ &= xS_1S_2(1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_1\delta_2) + \Delta_1S_1S_2(1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_1\delta_2) + \Delta_2S_2(1 + \delta_2) \end{aligned} \quad (3.43)$$

Пренебрегая произведениями погрешностей ввиду их малости, получаем:

$$y_p = xS_1S_2(1 + \delta_1 + \delta_2) + \Delta_1S_1S_2 + \Delta_2S_2. \quad (3.44)$$

Исходя из того, что номинальная функция преобразования $y = S_1S_2x$, получаем следующие модели различных видов погрешностей:

- абсолютная погрешность функции преобразования

$$y_p - y = xS_1S_2(\delta_1 + \delta_2) + \Delta_1S_1S_2 + \Delta_2S_2.$$

- аддитивная погрешность, приведенная к входу

$$\frac{y_p - y}{S_1S_2} = x(\delta_1 + \delta_2) + \Delta_1 + \frac{\Delta_2}{S_1}.$$

- аддитивная погрешность, приведенная к выходу

$$\Delta_Y = \Delta_1S_1S_2 + \Delta_2S_2.$$

- мультипликативная погрешность

$$\delta = \delta_1 + \delta_2$$

От простейшей двухзвенной измерительной цепи перейдем на многозвенную, состоящую из последовательно соединенных нескольких линейных звеньев (рисунок 3.21). Найдем в общем виде модель погрешности для таких измерительных цепей.

Номинальная функция преобразования n последовательно соединенных звеньев имеет вид:

$$y = x \prod_{i=1}^n S_i, \quad (3.45)$$

где y и x - выходная и входная величины; n - число звеньев; S_i - чувствительность звеньев.

Метрологическая модель такой цепи - это совокупность формул для вычисления мультипликативной и аддитивной погрешностей соединения

$$\delta = \sum_{i=1}^n \delta_i; \Delta_y = \sum_{i=1}^n \left(\Delta_i \prod_{j=i}^n S_j \right) \text{ или } \Delta_x = \Delta_1 + \sum_{i=2}^n \left(\Delta_i \prod_{j=1}^{i-1} \frac{1}{S_j} \right), \quad (3.46)$$

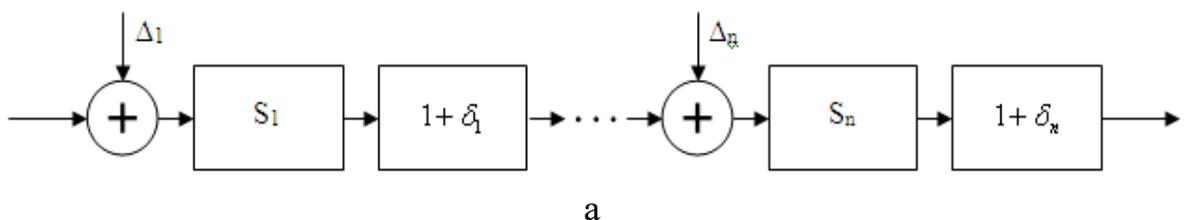
где δ – максимальная мультипликативная погрешность измерительной цепи; δ_i - мультипликативные относительные погрешности звеньев (погрешности чувствительностей S_i); Δ_y и Δ_x - аддитивные предельные абсолютные погрешности соединения, приведенные к выходу и к входу соответственно; Δ_i - аддитивные предельные абсолютные погрешности звеньев, приведенные к их входам.

Если число слагаемых в сумме больше двух, то удобно использовать формулы математической статистики: вычисление среднеквадратических и среднегеометрических величин, так как они дают реальные величины погрешностей:

- среднеквадратическая форма $\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots}$

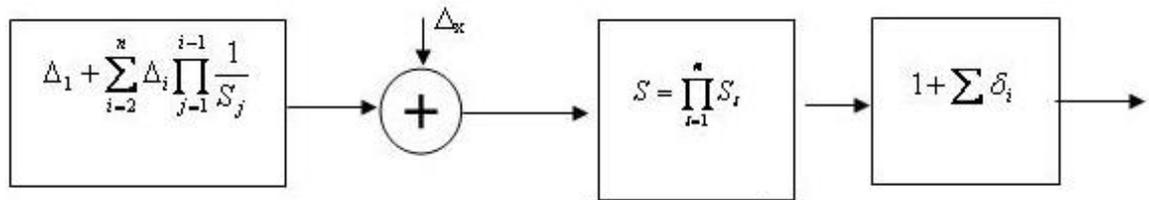
и среднегеометрическая форма $\delta = \sqrt{\sum (\delta_i)^2}$ или $\Delta = \sqrt{\sum (\Delta_i)^2}$.

Метрологическая модель многозвенной измерительной цепи, показанной на рисунке 3.22, строится по аналогии с моделью соединения двух звеньев (рисунок 3.21).



а - развернутый; б - сжатый

Рисунок 3.22 - Два варианта представления метрологической модели многозвенной измерительной цепи, лист 1



б

Рисунок 3.22, лист 2

3.8. Разработка моделей емкостных измерительных модулей и чувствительных элементов датчиков давления и температуры [102, 103]

Схема ЧЭ емкостного ДДТ с растягивающейся диафрагмой или мембраной показана на рисунке 3.23. Круглая мембрана диаметром $2a$ при воздействии давления с одной стороны принимает форму сферы, а ее отклонение Y от ненагруженного состояния для любого радиуса r будет

$$Y = 2\sigma / P \left[\sqrt{1 - (rP/2\sigma)^2} - \sqrt{1 - (aP/2\sigma)^2} \right] \quad (3.47)$$

где σ – напряжение в диафрагме по окружности, P – давление.

Уравнение (3.47) можно записать в виде ряда

$$Y = \frac{P}{4\sigma} \left[(a^2 - r^2) + \frac{1}{16} \left(\frac{P}{\sigma} \right)^2 (a^4 - r^4) + \frac{1}{512} \left(\frac{P}{\sigma} \right)^4 (a^6 - r^6) + \dots \right] \quad (3.48)$$

Когда отклонения незначительны, то достаточно первого члена уравнения (3.47), который определяет линейную составляющую зависимости между отклонением и давлением.

Таким образом, для $(h/a)^2 \ll 1$

$$Y = \frac{P}{4\sigma} (a^2 - r^2) \quad (3.49)$$

Для узкой кольцеобразной зоны на сфере шириной dr и длиной $2\pi r$, первоначально располагавшейся на расстоянии δ от неподвижной пластины, приращение емкости

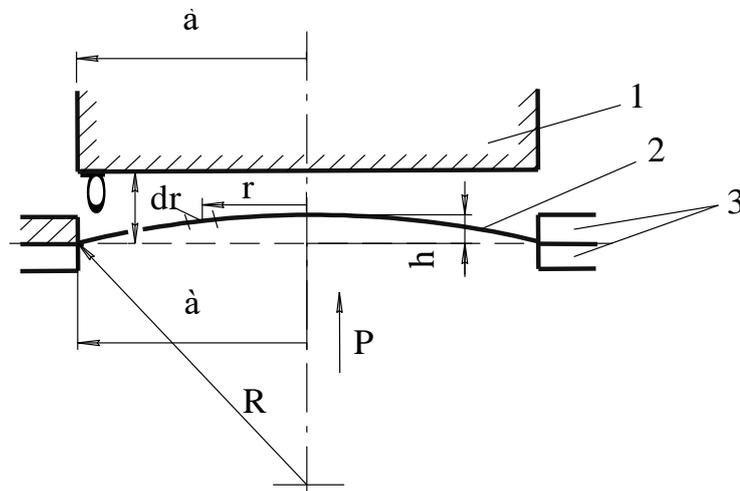
$$\Delta C = \varepsilon 2\pi r \cdot dr / (\delta - Y) \quad (3.50)$$

Для малых отклонений ($Y/\delta \ll 1$) $1/(\delta - Y)$ можно приближенно выразить так

$$\frac{1}{(\delta - Y)} \approx \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{Y}{\delta} \right) \quad (3.51)$$

Тогда полная емкость между сферической поверхностью отклоняемой мембраны и неподвижным электродом (при начальной емкости C) равна

$$C + \Delta C = \int_0^a dC = \frac{2\pi\epsilon}{\delta} \int_0^a \left(1 - \frac{Y}{\delta}\right) r dr \quad (3.52)$$



1 – неподвижный электрод; 2 – мембрана; 3 – держатель
Рисунок 3.23 - Чувствительный элемент с растягивающей мембраной

Подставляя значение Y из уравнения (3.49) в (3.52), для малых отклонений получим

$$C + \Delta C = \frac{2\pi\epsilon}{\delta} \int_0^a \left[1 + \frac{P}{4\sigma\delta} (a^2 - r^2)\right] r dr = \frac{\pi\epsilon}{\delta} a^2 + \frac{\pi\epsilon}{\delta} \frac{P}{4\sigma\delta} \int_0^a (a^2 - r^2) r dr \quad (3.53)$$

Первый член уравнения (3.53) представляет начальную емкость C мембраны до деформации, следовательно,

$$\Delta C = \frac{\pi\epsilon P}{4\sigma\delta^2} \int_0^a (a^2 - r^2) r dr = \frac{\pi\epsilon P a^4}{8\delta^2 \sigma} \quad (3.54)$$

Анализируя формулу (3.54) можно сделать следующий основной вывод: изменение емкости линейно зависит от измеряемого абсолютного давления P , диэлектрической проницаемости среды ϵ между обкладками конденсатора, радиуса и обратно пропорциональна квадрату перемещения δ мембраны, напряжению, возникающему в мембране при воздействии абсолютного давления, равного пределу измерения.

Перейдем от ММ емкостных датчиков давления и температуры к конкретным конструктивным исполнениям и числовым моделям.

На рисунке 3.24 представлен емкостной ЧЭ, на основе кремния.

Конструктивно ЧЭ представляет собой мембранную коробку, состоящую из двух складывающихся кремниевых мембран (поз. 1, 2), на которых сформированы обкладки конденсатора (поз. 3, 4), образующие между собой зазор h величиной 5 мкм. Для снятия характеристик предусмотрены контактные площадки (поз. 5, 6), к которым крепятся электрические выводы

Емкость каждого плоского конденсатора C_x определяется по формуле

$$C_x = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S_x}{\delta_0} \quad (3.55)$$

где C_x – рабочая емкость (емкость изменяемая пропорционально изменению межэлектродного зазора, вызванного прогибом мембраны от измеряемого давления P); C_o – опорная емкость (постоянная емкость, не зависящая от прогиба мембраны); $\varepsilon_0=0,00885$ пФ/мм – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ε – относительная диэлектрическая проницаемость межэлектродной среды. Для вакуума $\varepsilon \approx 1$; $\delta=0,005$ мм – исходный межэлектродный зазор при отсутствии прогиба мембраны от измеряемого давления (обеспечивается конструкцией).

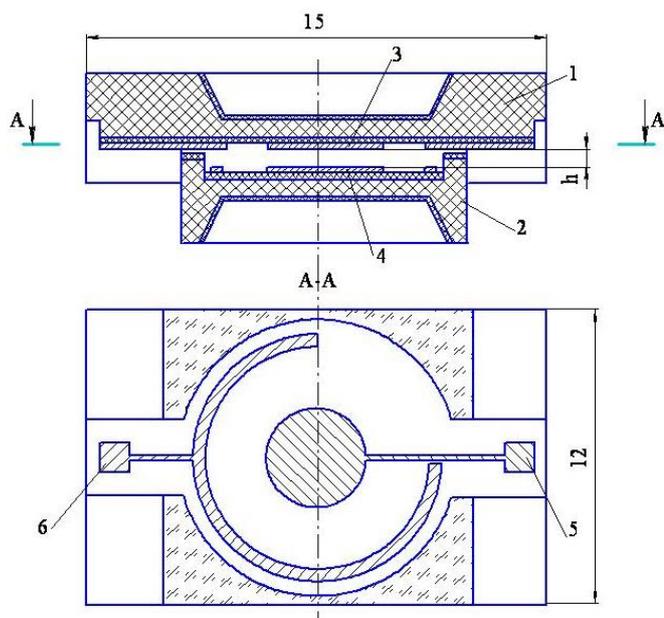
Первоначальная емкость между обкладками конденсатора должна составлять порядка 5 пФ. Исходя из этого емкость обкладки конденсатора на каждой мембране должна составлять 10 пФ, для последовательного соединения имеем:

$$\Delta C_o = \frac{C_x \cdot C_o}{C_x + C_o} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \text{ пФ}. \quad (3.56)$$

Из формулы (3.54) находим $S_x = S_o = 5,72$ мм² – площадь обкладок рабочего и опорного конденсатора (обеспечивается конструкцией).

Зная площадь обкладок конденсаторов $S = 2 \cdot \pi \cdot R^2$, можно определить геометрические размеры для рабочего и опорного конденсатора.

На предлагаемой конструкции ЧЭ (рисунок 3.24) площадь опорного конденсатора занимает площадь $\frac{3}{4}$ кольца. Такая конфигурация увеличивает ширину проводящего слоя, которая облегчает задачу совмещения топологических слоев.



1, 2 – мембраны; 3, 4 – обкладки конденсатора; 5, 6 – контактные площадки
 Рисунок 3.24 - ЧЭ микромеханического емкостного абсолютного датчика давления и температуры

Термочувствительный элемент на емкостном модуле давления может быть сформирован, как отдельная емкостная структура, которая сформирована на поверхности в том месте, где механические деформации минимальные, а воздействие температуры – максимальное [104, 105].

Для расширения диапазона измерений (в область низкого давления) микромеханического емкостного датчика сверхнизких абсолютных давлений необходимы очень тонкая мембрана и очень малый зазор. Толщина мембраны предложенного ЧЭ для диапазона измерений от 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. составит 5 мкм, зазор между мембранами и соответственно межэлектродный зазор составит 5 мкм.

Были сделаны расчеты подтверждающие работоспособность предлагаемой конструкции ЧЭ.

Прогиб мембраны без жесткого центра с жестко заземленным контуром под воздействием нагрузки, равномерно распределением по всей поверхности определяется по формуле [106, 107]

$$\omega = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) P R^4}{12 \cdot E h^3}, \quad (3.57)$$

где P – измеряемое давление; R – радиус мембраны; h – толщина мембраны; E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуассона

Наибольшее эквивалентное напряжение, возникающее по краям мембраны от приложенного давления, определяется по формуле

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{3 \cdot (1 - \mu + \mu^2) \cdot 0,5PR^4}{4 \cdot h^2} \quad (3.58)$$

Напряжения, возникающие в центре мембраны, определяется по формуле

$$\sigma_o = \frac{3 \cdot (1 + \mu) \cdot PR^4}{8 \cdot h^2} \quad (3.59)$$

Коэффициент запаса по прочности определяется

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{экв}}} \quad (3.60)$$

Расчеты сведены в таблицы 3.2 и 3.3.

Расчет проводился для ЧЭ датчика абсолютного давления с диапазоном измерения 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-2}$ мм.рт.ст. с мембраной без жесткого центра с жестко заземленным контуром под воздействием нагрузки, равномерно распределением по всей поверхности.

Таблица 3.2 - Исходные данные

| Наименование | Обозначение | Единица измерения | Значение |
|---|-------------|--------------------|-----------|
| Воздействующее давление | P | кг/см ² | 0,0000272 |
| Радиус мембраны | R | мм | 3 |
| Толщина мембраны | h | мм | 0,005 |
| Модуль упругости материала мембраны | E | кг/мм ² | 18000 |
| Коэффициент Пуассона материала мембраны | μ | | 0,3 |
| Предел упругости материала мембраны | σ_y | кг/мм ² | 9,47 |
| Текущее значение радиуса мембраны | r | мм | 0 |

Таблица 3.3 - Результаты расчета

| Наименование | Обозначение | Единица измерения | Значение |
|---|----------------|--------------------|-------------|
| 1. Прогиб центра мембраны | w _o | мм | 0,00126783 |
| 2. Наибольшее эквивалентное напряжение (у заделки мембраны) | s _k | кг/мм ² | 0,05686169 |
| 3. Напряжение в центре мембраны | s _o | кг/мм ² | 0,04158336 |
| 4. Коэффициент запаса | n | — | 166,5444681 |

Особенно следует отметить высокие механические свойства кремния. В отличие от поликристаллических материалов, кремний может многократно подвергаться воздействию механических напряжений, не проявляя эффекта усталости. Кремниевые структуры могут выдерживать давления свыше 350 МПа и ускорение до 10^6 м/с² [108, 109].

Однако, под нагрузкой при комнатной температуре кремний ломается, в то время как металлы претерпевают пластическую деформацию. За поломку кремниевых структур отвечают дефекты на краях или поверхности пластин. Полирование полупроводниковых пластин и химическая обработка резко повышают их прочность. Деформации, которые уверенно выдерживают кремниевые кристаллы, лежат в пределах $2 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-3}$. Специальная физико-химическая обработка поверхности кремния за счет снижения дефектов, дает возможность повысить деформацию в 2–2,5 раза без разрушения кремния [110].

Выводы по 3 разделу

1. Проведено моделирование элементов и структур совмещенных датчиков давления и температуры, при этом разработаны и исследованы модели упругих элементов датчиков, что позволило рассчитать динамические характеристики (собственные частоты и частотные диапазоны работы УЭ) и снизить затраты на разработку датчиков.

2. На примере пьезоэлектрического ЧЭ проведено моделирование собственных частот УЭ с учетом влияния присоединенной массы, что позволило повысить информативность характеристик динамических характеристик датчиков.

3. Разработаны аналитические и численные математические модели элементов измерительных преобразователей (ИП) давления и температуры с использованием инженерных моделей и программы ANSYS.

4. Разработаны алгоритмы программ моделирования мембранных ЧЭ и приведен листинг программы.

5. Исследованы деформационные явления в микроэлектромеханических структурах ИП и проведен анализ влияния МН на характеристики ЧЭ и датчиков.

6. Разработаны математические модели емкостных ЧЭ и многозвенных ИП.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ УЗЛОВ И КОМПОНЕНТОВ СОВМЕЩЕННЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ.

В результате проведения диссертационных исследований были разработаны и исследованы УЭ и ИМ совмещенных датчиков давления и температуры, а также сами микроэлектронные датчики. Рассмотрим подробно полученные результаты с позиций как научного, так и практического вклада в научно-технический прогресс и инновационную направленность промышленности Республики Казахстан.

4.1 Разработанные конструктивно-технологические решения для МЭД давления и температуры

В процессе диссертационных исследований были разработаны топология и конструкции ЧЭ и ИМ совмещенных датчиков давления и температуры, различного рода физико-математические модели, методы диагностики сенсорных структур и элементов и проч., рассмотрим некоторые из них [58, с. 5; 59, с. 160; 66, с. 57; 95, с. 560].

На рисунке 4.1. показаны различные топологии ПЧЭ датчиков давления и температуры, в которых в качестве ДЧЭ служат пьезорезисторы, а в качестве ТЧЭ служат диффузионные или ионнолегированные терморезисторы [111; 41, с. 45]. Приведены разные конструктивные исполнения: а, б – с пьезо- и терморезисторами; в и г – с элементами настройки и высоколегированной коммутацией.

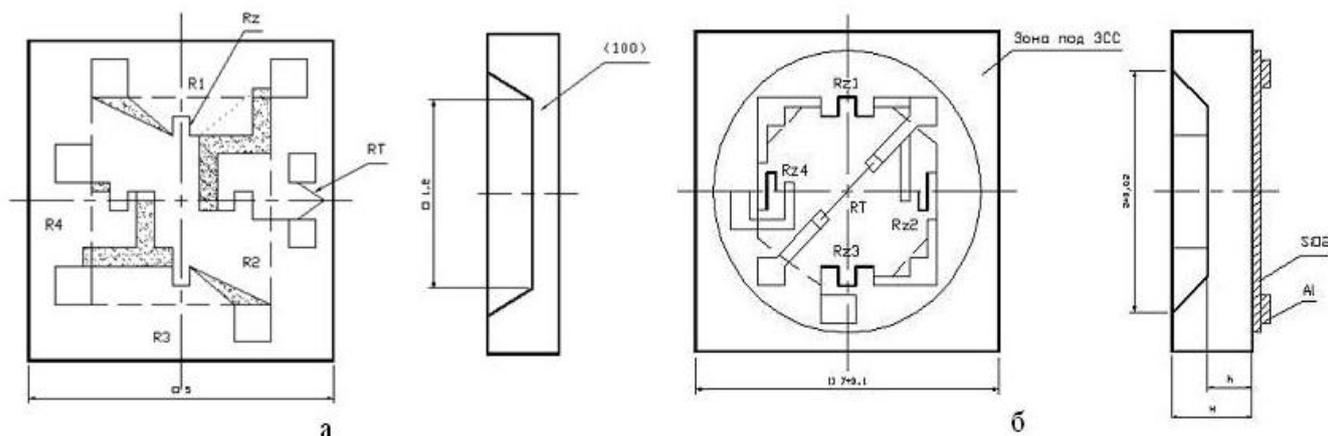


Рисунок 4.1 - Топологии ПЧЭ совмещенных датчиков давления и температуры, лист 1

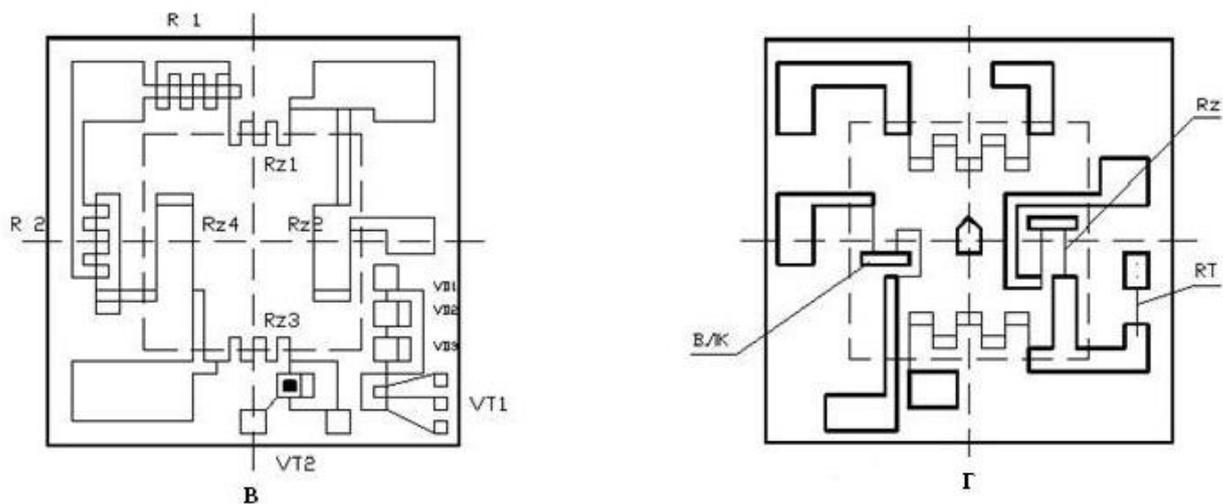
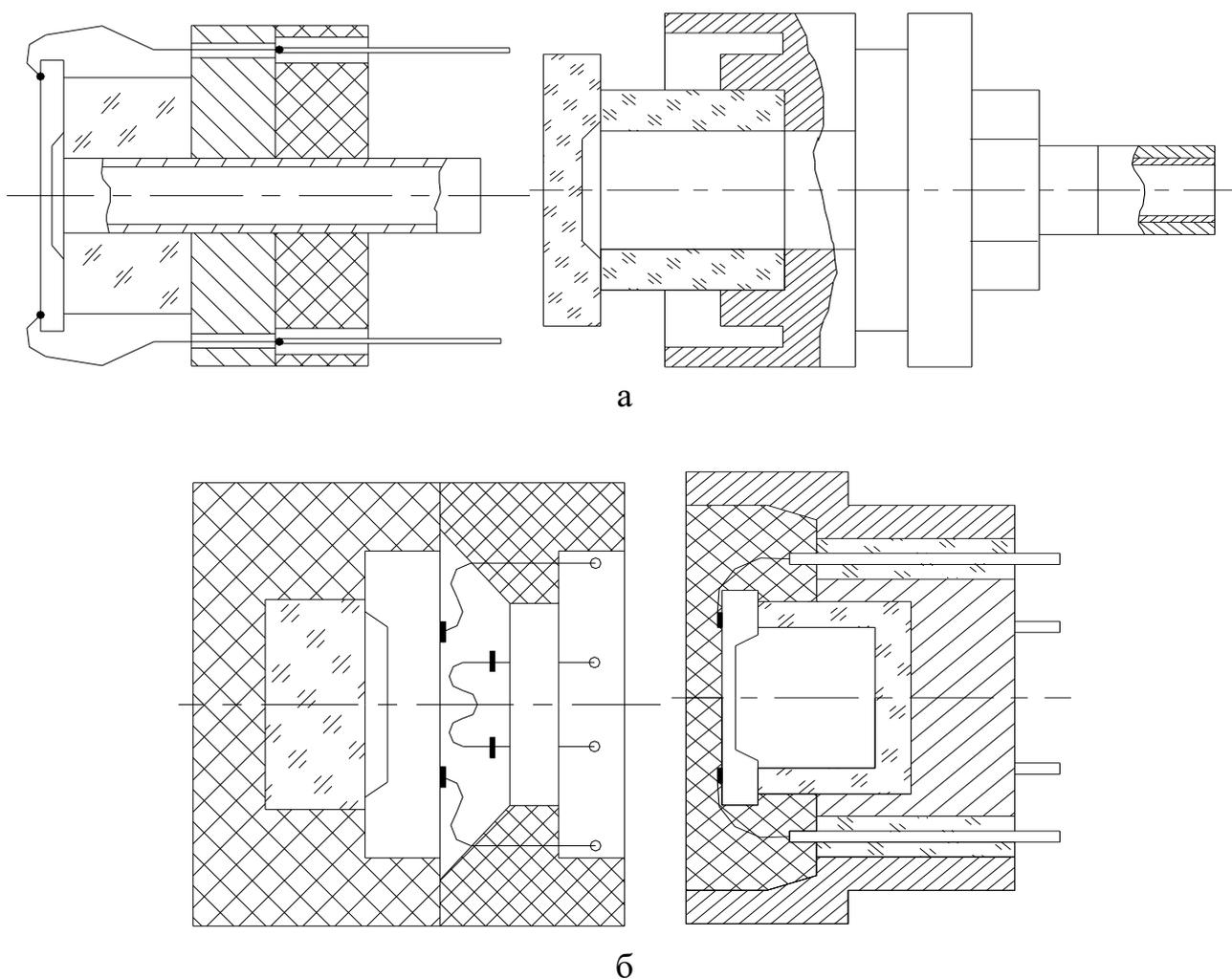


Рисунок 4.1, лист 2

На основе указанных ПЧЭ, изготавливались измерительные модули, которые являются основными функциональными узлами МЭД (рисунок 4.2).



а – избыточного давления; б - абсолютного давления
Рисунок 4.2 - Конструкции измерительных модулей датчиков

4.2. Выбор и анализ материалов и комплектующих для совмещенных датчиков давления и температуры

Очень важным этапом разработки и изготовления продукции приборостроения, в частности, микроэлектронных датчиков физических величин (МЭД ФВ), является выбор материалов, которые во многом определяют большинство технических характеристик и эксплуатационных свойств датчиков: временную и параметрическую стабильность, устойчивость к помехам и внешним факторам, точность, чувствительность, механическую прочность и т. д.

Некорректно выбранный материал или технология его обработки могут привести к отказу датчика как на этапах сборки и испытания, так и, что самое опасное, в процессе эксплуатации. Поэтому знание свойств и характеристик материалов, их поведения в широком диапазоне температур и механических воздействий, а также их технологические особенности применения, являются обязательными условиями создания надежных и стабильных датчиков физических величин, особенно микроэлектронных [112; 51, с. 10].

Следует отметить, что по своей сути, МЭД ФВ является системой с сильной гетерогенностью как по отношению к материалам, так и к методам преобразования. С материаловедческой точки зрения в составе МЭД ФВ присутствуют различные металлы, сплавы, диэлектрики, полупроводники, проводники. Кроме того, вид материалов также самый разнообразный: пленки, легирующие добавки, объемные материалы, монокристаллы, поликристаллы, аморфные материалы и проч. (рисунок 4.3).

Для стабильной работы такой сложной системы, как МЭД ФВ, требуется выполнение электрофизической и химической совместимости, как самих материалов, так и элементов и узлов на их основе, таковыми в МЭД ФВ являются чувствительные элементы (ЧЭ) и измерительные модули (ИМ).

По своей сути современные МЭД ФВ представляют собой сложные измерительные системы, состоящие из отдельных подсистем и элементов, между собой взаимосвязанных конструктивно и функционально. Поэтому материалы и комплектующие, входящие в МЭД ФВ, следует рассматривать как отдельные подсистемы, определяющие, в значительной мере основные технические характеристики датчиков [113, 114].

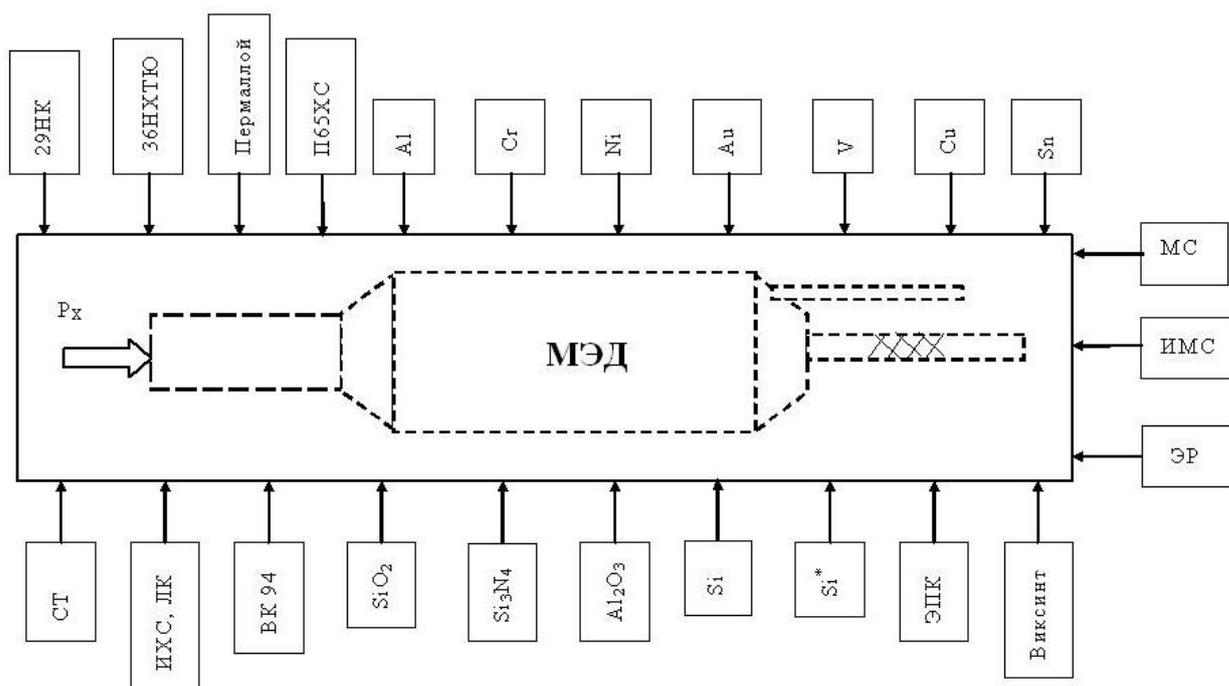
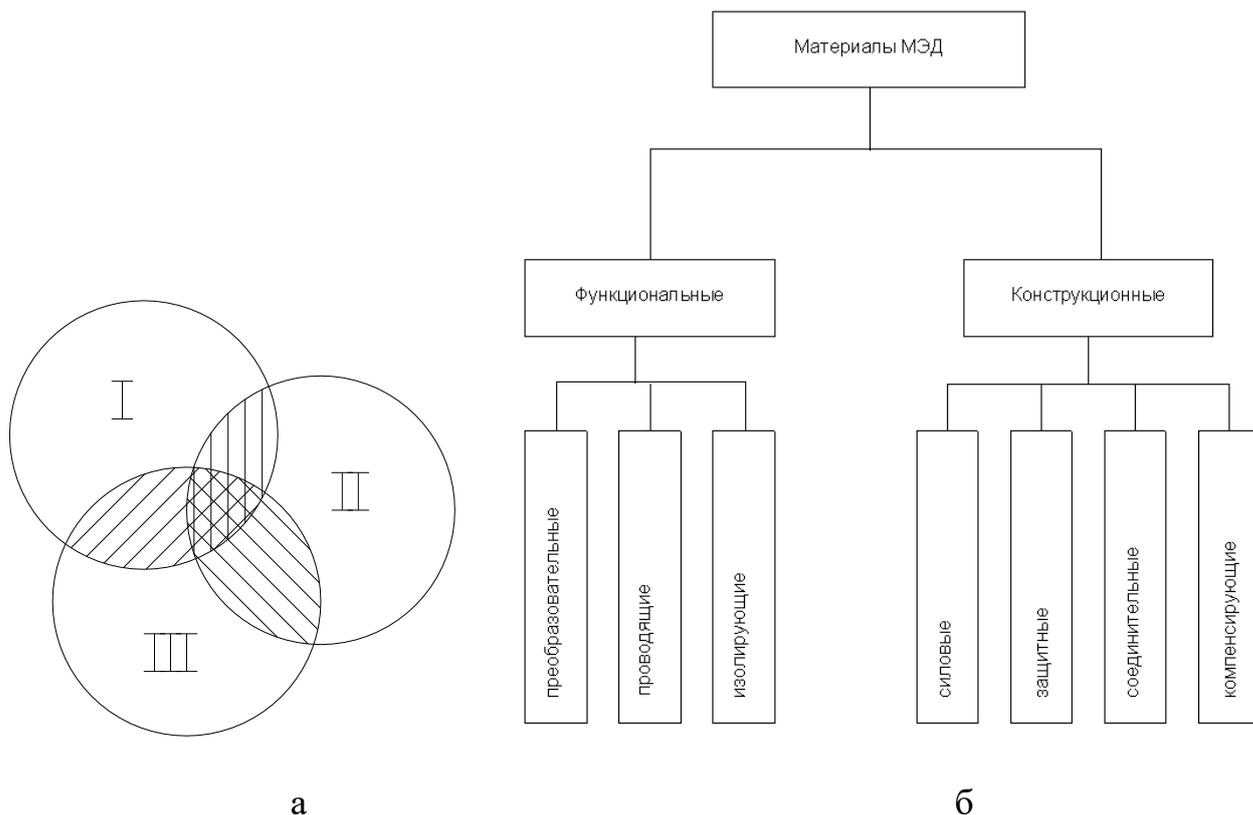


Рисунок 4.3 - Микроэлектронный датчик – система с высокой степенью разнообразия используемых материалов (в блоках указаны металлы, окисные пленки, МС – гибридная микросхема, ИМС - интегральная микросхема, ЭР - электрический резистор)

Все материалы с позиции их назначения можно условно разделить на следующие группы (рисунок 4.4):

- 1) Силовые – обеспечивают передачу измеряемой величины;
- 2) Функциональные – осуществляют преобразование измеряемой величины;
- 3) Защитные – обеспечивают защиту элементов, систем и подсистем от внешних воздействий.

Здесь следует пояснить, что заштрихованные области пересечения множеств материалов на рисунке 4.4, а означают многозначность функций, выполняемых одними и теми же материалами. Например, в металлопленочных датчиках давления стальная мембрана одновременно обеспечивает и защиту от измеряемой среды, и передачу давления (силовую функцию), в пьезорезонансных датчиках кварц обладает и силовыми, и функциональными свойствами. Еще более убедительна такая классификация для полупроводниковых МЭД ФВ (рисунок 4.4, б).



а - множество МЭД ФВ; б - классификация МЭД ФВ
 Рисунок 4.4. - Множество материалов МЭД ФВ

Рассмотрим более подробно группу функциональных материалов, так как они в наибольшей степени определяют свойства датчиков в целом.

Функциональные материалы

К ним относят те материалы, которые непосредственно участвуют в процессе функционального преобразования входной измеряемой величины в выходную. Процесс преобразования заключается в использовании определенных физических эффектов, присущих данному материалу (пьезорезистивный, терморезистивный, магнитоэлектрический и проч.) для однозначной идентификации входной величины, путем модуляции параметров материала (сопротивления, заряда, термо-ЭДС и т.п.).

К наиболее используемым в МЭД ФВ функциональным материалам относятся

1. Кремний;
2. Тензорезистивные сплавы;
3. Пьезокерамика;
4. Кварц;
5. Пьезопленки.

Следует отметить, что такие, широко распространенные в приборостроении материалы, как кремний и кварц, могут совмещать и силовые и преобразовательные функции, одновременно выполняя функции, как упругого (силового) материала, так и функционального. Но здесь следует подчеркнуть, для того, чтобы кремний и кварц выполняли двойную задачу, они

подвергаются модификации: в частности, кремний легируется определенными примесями, изменяющими его локальную проводимость. Кварц для ЧЭ (силовой материал) может иметь аморфную структуру, в то время как для пьезоакустических ЧЭ (функциональный материал) он должен быть монокристаллическим. Такое сочетание может быть достигнуто, например, перекристаллизацией кварца лазерным лучем [115].

Важной особенностью монокристаллического кремния как функционального материала является возможность его микропрофилирования, что позволяет создавать на его базе трехмерные измерительные структуры МЭД ФВ [116]. Следует отметить, что монокремний (МК) обладает анизотропией основных электрофизических характеристик (прочность, электропроводность, теплопроводность, травимость), поэтому при указании свойств МК следует указывать его кристаллографическую ориентацию.

Основными преимуществами кремния как материала для интегральных микросхем и МЭД ФВ являются [117]:

- большой диапазон удельных сопротивлений от 10^{-3} Ом·см (вырожденный) до $1 \cdot 10^5$ Ом·см (собственная проводимость), что позволяет использовать его как проводник, так и как изолятор;
- высокое значение модуля упругости и значительная жесткость, большая, чем у стали;
- малая плотность и низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР);
- высокая теплопроводность;
- наличие высокой тензочувствительности;
- высокая растворимость примесей - диффузантов, которые мало искажают кристаллическую решетку;
- пассивирующие, защитные и маскирующие свойства собственного окисла;
- возможность образования значительного числа химических соединений, обладающих ценными свойствами (стабильность, коррозионная стойкость и проч.): SiO_2 , Si_3N_4 , SiC , силициды;
- способность внутреннего геттерирования вредных примесей в присутствии кислорода, растворенного в кремнии;
- возможность выращивания тонких совершенных монокристаллических слоев и получения изолирующих структур (КНК);
- способность наращивания на некоторые диэлектрические подложки (лейкосапфир, шпинель);
- возможность модификации структуры с целью управления свойствами (поликристаллический и аморфный кремний, пористый кремний);
- прецизионная микромеханическая обработка кремния;
- нетоксичность самого кремния и его соединений.

Следует отметить, что основным недостатком монокремния как материала для ЧЭ МЭД ФВ является его недостаточная температурная стабильность, которая объясняется в основном его сравнительно узкой запрещенной зоной,

составляющей 1,1 эВ при 300 К, что не позволяет использовать кремний при больших температурах и значительных уровнях электромагнитных и радиационных воздействий. Последнее объясняется тем, что энергии теплового возбуждения кристаллической решетки, а также энергии фотонов и элементарных частиц бывает вполне достаточно, чтобы инициировать переходы электронов и дырок через потенциальные барьеры в полупроводниковых структурах. Рост количества дефектов (термических, радиационных), порожденных термоударами, радиацией и механическими деформациями, приводит к нестабильности характеристик МЭД ФВ и дрейфу их параметров во времени.

Кроме монокристаллического кремния (МК) все большее распространение в МЭД ФВ получает поликристаллический кремний (ПК), который в отличие от МК изотропен по своим электро-физическим характеристикам (ЭФХ). Это объясняется тем, что ориентация кристаллов (зерен) в объеме ПК – произвольная и основные его ЭФХ обусловлены наличием межзеренных границ и объемного заряда, образующегося на этих границах. Основным преимуществом ПК по сравнению с МК является возможность формирования из него ЧЭ, не содержащих «р–п» переходы, что позволяет повысить рабочую температуру датчиков до 200...250 °С. Изменяя концентрацию легирующих примесей в ПК (модификация ПК), можно получить практически нулевое значение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) пьезорезисторов. Проводимость ПК регулируется технологическими методами путем изменения дозы легирующей примеси, а также энергией легирующих ионов и температурой подложки [51, с. 11; 118; 119].

Широкая гамма стабильных МЭД ФВ (давления, температуры, оптических излучений) может быть изготовлена с использованием аморфного кремния (Si^{**}), который с 1976 г. стал активно применяться в микроэлектронике. Благодаря некоторым своим уникальным свойствам он является перспективным функциональным материалом [120].

Перечислим основные свойства аморфного кремния:

- высокое оптическое поглощение в видимой части спектра;
- кристаллоподобные свойства, которые могут быть достигнуты при смешивании микрокристаллической и аморфной фаз;
- температура осаждения Si^{**} низкая (200...300°С), поэтому могут быть применены самые разнообразные подложки, в том числе и органические пленки;
- материал стабилен во времени;
- прост процесс фотолитографии, который является основным при изготовлении МЭД ФВ;
- могут формироваться как пассивные, так и активные элементы.

Следующим, после первого иерархического уровня – материалов, которые представлены выше, следуют детали и узлы датчиков которые должны быть объединены в единую конструкцию. Для обеспечения временной и параметрической стабильности ДФВ необходимо, чтобы взаимодействующие

элементы и материалы системы были конструктивно и функционально совместимы [17, с. 115]. Основными условиями совместимости являются:

- минимизация разности в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) соединяемых материалов;
- минимальные значения внутренних механических напряжений в материалах и структурах;
- герметичность зоны соединения разнородных материалов.

В процессе проведения диссертационных исследований совместно с научным руководителем на одном из приборостроительных предприятий г. Пензы были изготовлены ЧЭ и ИМ (рисунок 4.5), а также экспериментальные образцы совмещенного МЭД давления и температуры ДДТ-2, который представлен на рисунок 4.6)



Рисунок 4.5 - Фотография микромеханических узлов (ЧЭ и ИМ) МЭД, изготовленных с применением ЭСС

На рисунке 4.6 приняты следующие обозначения:

а – конструкция: 1 – элемент чувствительный (ЭЧ); 2 – приемный штуцер; 3 – компенсационная плата (КП); 4а – корпус, 4б – крышка; 5 – внешние электрические выводы; 6 – внутренние электрические выводы;

б – схема электрическая: R_{t1} , R_{t2} - терморезисторы, $R1-R4$ - пьезорезисторы, $R_{к1}-R_{к5}$ – компенсационные резисторы

ПЧЭ (рисунок 4.6, поз.1) содержит кремниевый кристалл, соединенный электростатическим способом со стеклянным кольцом. В теле кремниевого кристалла методами интегральной технологии сформированы пьезорезисторные и терморезисторные элементы. Мостовая схема проводниками 6 соединяется с нормализующей тонкопленочной компенсационной платой. Электрический сигнал, соответствующий измеряемому параметру, подается на внешние электрические выводы.

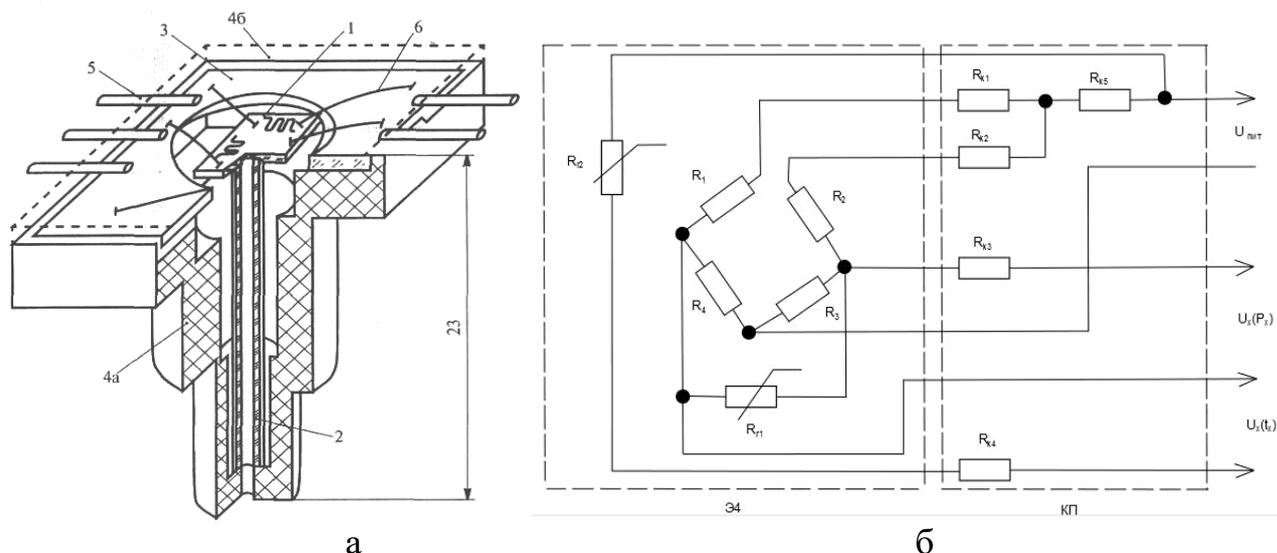
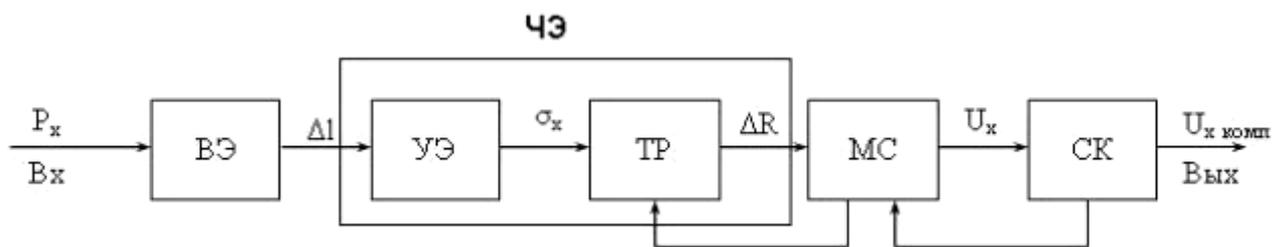


Рисунок 4.6 - Внешний вид совмещенного МЭД давления и температуры типа ДДТ-2 и его принципиальная электрическая схема

Элементом, воспринимающим давление и температуру, является миниатюрный кремниевый профилированный кристалл с пьезорезисторами, соединенными в мост Уинстона и терморезисторами, один из которых служит для целей термокомпенсации, а второй является термодатчиком. Для уменьшения влияния переходных сопротивлений на точность датчика все межэлементные соединения в кристалле выполнены в виде высоколегированных областей.

Номинал терморезисторов R_{t1} и $R_{t2}=30$ кОм, при $\rho_s=1000$ Ом/квadrat. Терморезисторы сформированы имплантацией ионами бора. Резисторы компенсационной платы - тонкопленочные из сплава X20H75Ю, осажденного методом термовакuumного напыления на ситалловую подложку. Контактная металлизация - хром-медь-никель. Все резисторы компенсационной платы подгоняются после монтажа ее в корпус датчика. Подгонка осуществляется на лазерной установке типа АМЦ-076.

На базе профилированного ПЧЭ (рисунок 4.1) был разработан и изготовлен миниатюрный МЭД статико-динамического давления и температуры, функциональная и принципиальная схемы которого приведены на рисунках 4.7 и 4.8, а конструкция – на рисунке 4.9.



ВЭ - воспринимающий элемент, УЭ - упругий элемент, ТР – тензорезистор, МС - мостовая схема, СК - схема компенсации, ЧЭ - чувствительный элемент
 Рисунок 4.7 - Функциональная схема датчика ДДТ-1

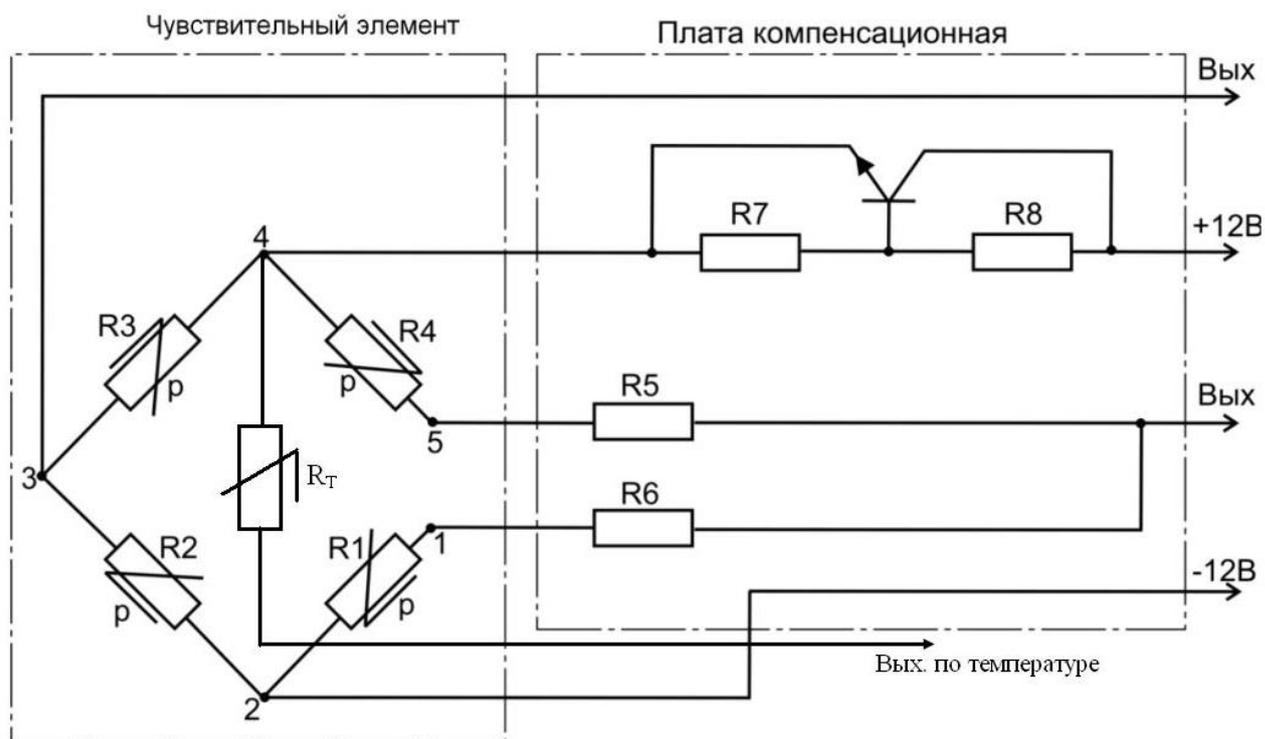


Рисунок 4.8 - Электрическая схема датчика давления и температуры ДДТ-1

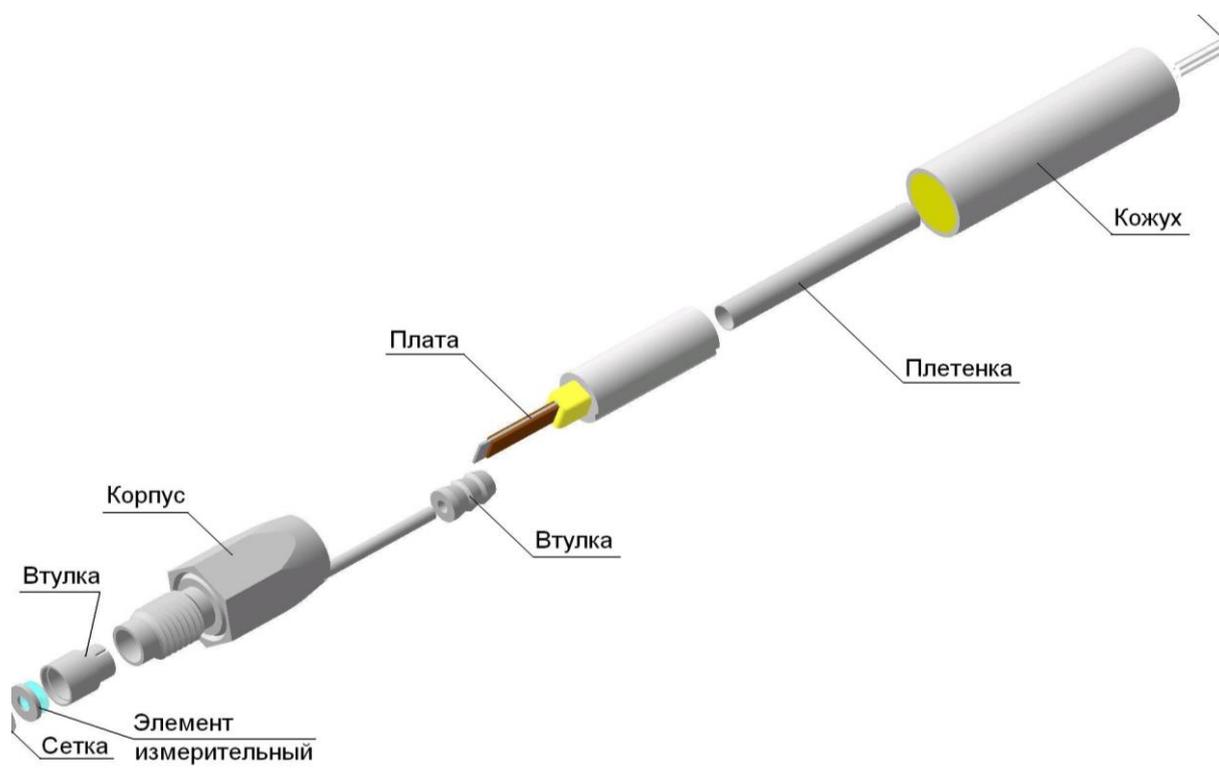


Рисунок 4.9 - Конструкция датчика давления и температуры ДДТ-1

Из рисунков 4.8, 4.9 видно, что датчик имеет модульную структуру, и изготовлен из отдельных блоков, поэтому он может подвергаться контролю и диагностике в процессе изготовления по блокам, что повышает надежность датчика в целом [19, с. 39; 121].

4.3. Метрологическое обеспечение испытания и исследования совмещенных датчиков давления и температуры

Для экспериментального подтверждения полученных ранее научных результатов в виде аналитических и численных математических моделей необходимо проведение натурных испытаний путем испытания экспериментальных макетов датчиков [122].

Рассмотрим весь комплекс вопросов по методике проведения и аппаратном оснащении испытаний [123].

Перечень контрольно-измерительных приборов, оснастки и оборудования, использованных при проведении испытаний приведен в таблице 4.1.

Следует отметить, что в связи с тем, что изменения температуры, как правило, является более медленным процессом, чем изменение динамических давлений, поэтому при температурных испытаниях в термостатах или в камерах тепла и холода температура является статическим и квазистатическим параметром. В редких случаях, когда изменение температуры имеет скачкообразный характер (термоудар), этот процесс имитируют быстрым переносом испытуемого датчика из высокотемпературной зоны в

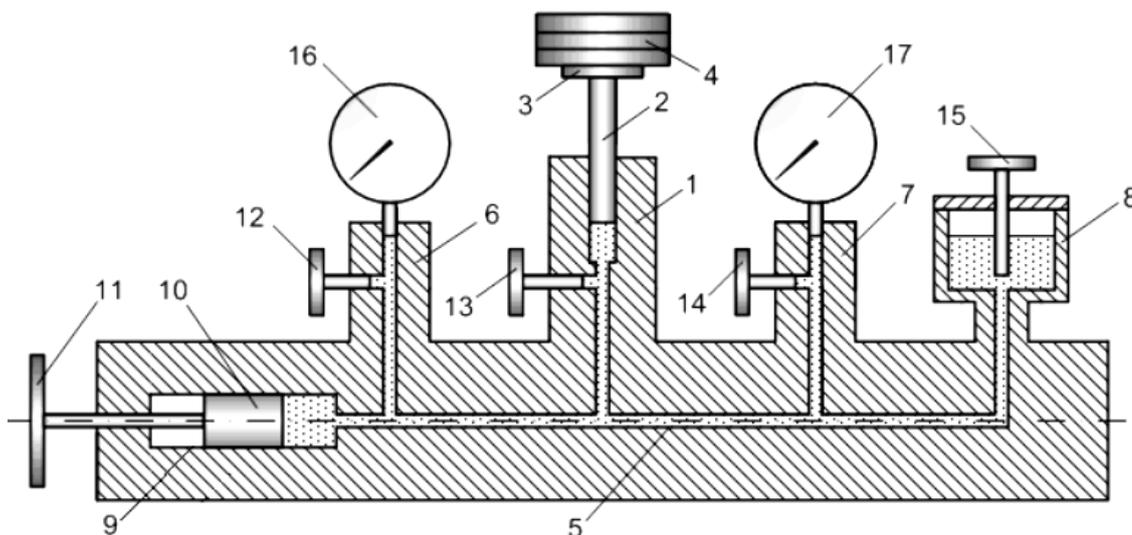
низкотемпературную, например, помещая нагретый датчик в сосуд с жидким азотом.

Таблица 4.1 - Перечень контрольно-измерительных приборов

| Наименование и тип | ГОСТ, ТУ или краткая техническая характеристика |
|---|---|
| Источник питания постоянного тока Б5-46 | ЕЭ3.233.219 ТУ |
| Прибор комбинированный цифровой Ц-300 | ТУ 25-04-3717-79 |
| Ампервольтметр Ф-30 | ТУ 25-04-1364-77 |
| Мегаомметр М4100/4 | ТУ 25-04.2131 |
| Тераомметр ЕЗ-13А | ЯЫ2.722.014 ТУ |
| Манометр грузопоршневой МП-600 | ГОСТ 8291-83 |
| Манометр образцовый МО-100-10 кгс/см ² | ГОСТ 6521-60 |
| Манометр образцовый МП-60 | ТУ 50.418-84 |
| Баллон со сжатым воздухом или азотом | ГОСТ 15860-84 |
| Редуктор РС-250-58 | СТУ 21-347-64 |
| Весы лабораторные равноплечие ВЛР-200г-2 | ГОСТ 24104-2001 |
| Климатическая камера Табай-МС71 | – |
| Камера тепла КТ-0,4-350 | Я7М 2.700.009 ТУ |
| Климатическая камера 3524/58 | – |
| Штуцер технологический | |
| Пульт для испытаний | |

Для испытания на статические давления чаще всего применяют универсальные грузопоршневые колонки типа МП, с которой подается регулируемое давление на испытываемый датчик (рисунок 4.10).

При составлении методик и программ испытаний, в обязательном порядке должны быть разработаны поверочные схемы испытания датчиков (рисунки 4.11 и 4.12).



1 – колонка, 2 - поршень, 3 - тарелка, 4 - контрольные грузы, 5 - горизонтальный канал, 6 и 7 - штуцеры, 8 - бачок с рабочей жидкостью, 9 - цилиндр, 10 - поршень, 11 - штурвал, 12...15 - вентили, 16 - поверяемый манометр (датчик давления), 17 - образцовый манометр

Рисунок 4.10 - Схема грузопоршневого манометра

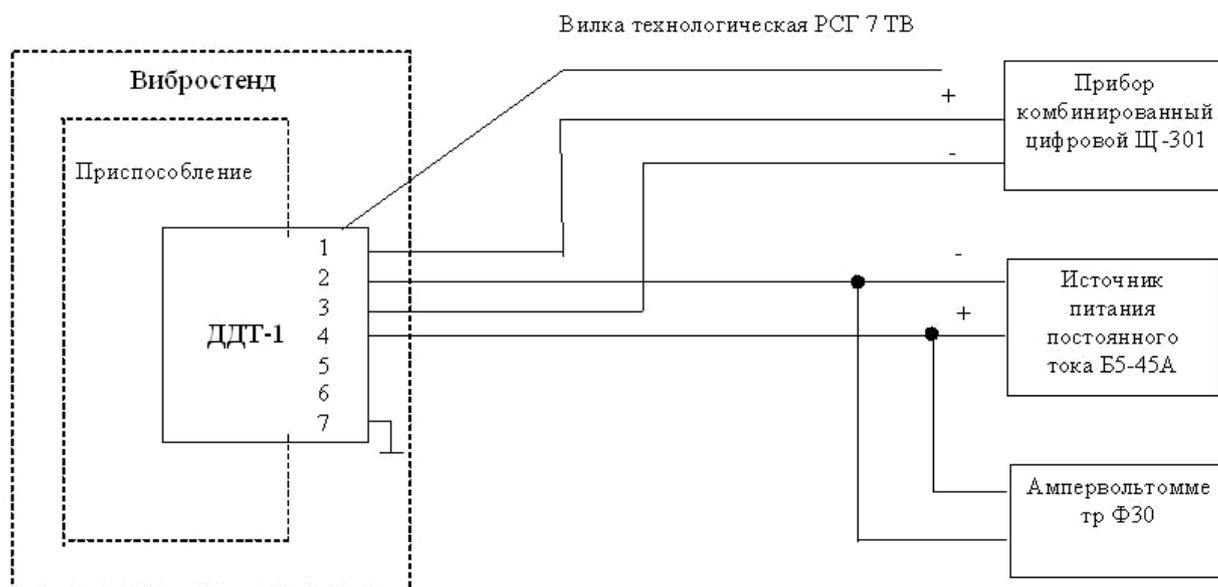


Рисунок 4.11 - Поверочная схема виброиспытаний датчика давления и температуры ДДТ-1

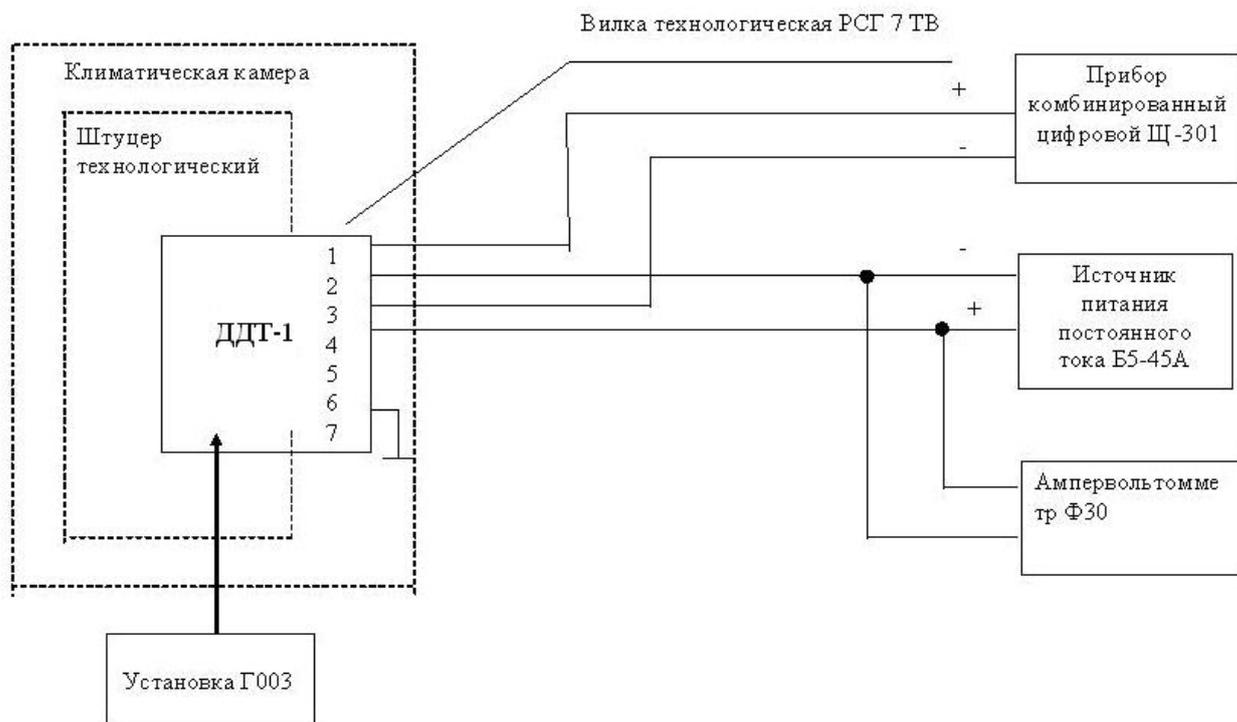


Рисунок 4.12 - Поверочная схема термоиспытаний датчика давления и температуры ДДТ-1

4.4. Результаты испытания и исследований элементов и узлов и совмещенных датчиков давления и температуры

Схема проверки технических характеристик ЧЭ и ИМ (тензорезисторов, терморезисторов, мостовой схемы и проч.) показана на рисунке 4.13.

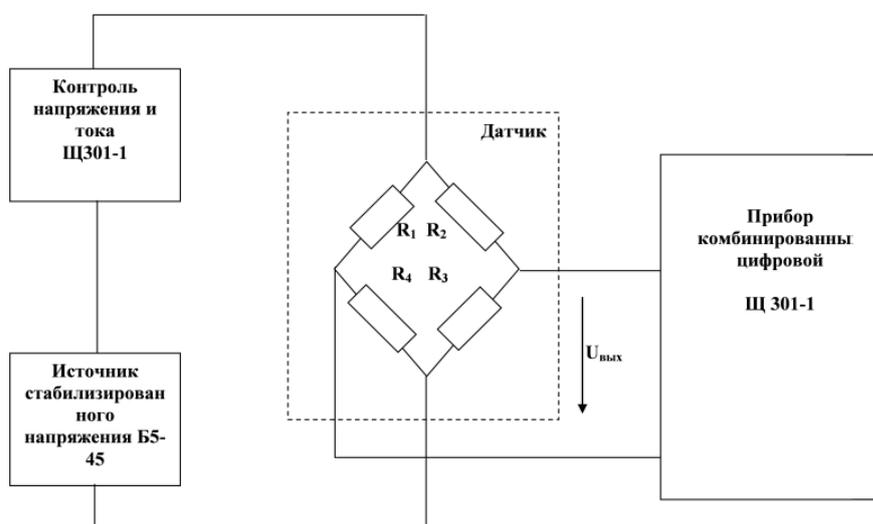
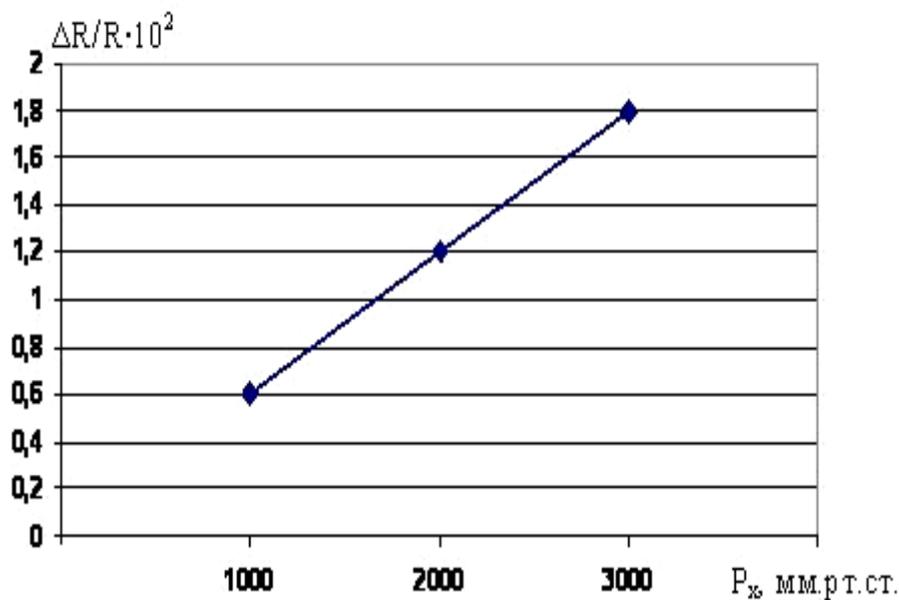
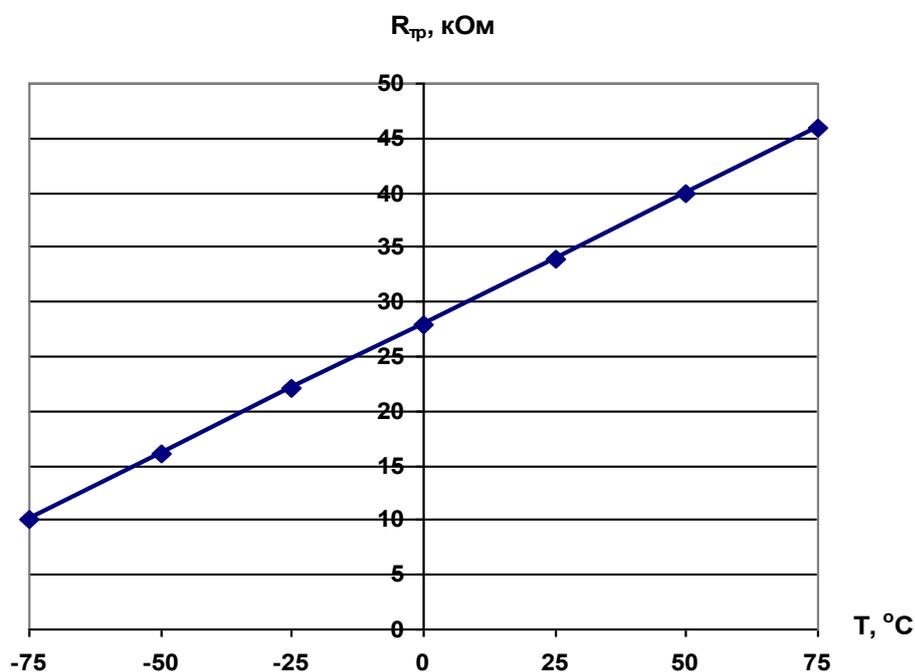


Рисунок 4.13 - Схема контроля характеристик первичного ИП датчика давления и температуры ДДТ-1

Результаты исследований совмещенного датчика давления и температуры ДДТ-1 представлены в виде графиков (рисунки 4.14-4.16), где показаны изменения параметров основных характеристик сенсорных элементов от давления и температуры [26, с. 28].



а



б

а - пьезорезисторов от измеряемого давления; б - терморезистора от температуры для ДДТ-1

Рисунок 4.14 - Графические модели зависимостей сопротивления

В процессе испытаний ДДТ-1 также были исследованы зависимости сопротивления пьезорезисторов от температуры, результаты представлены на

графике (рисунок 4.15).

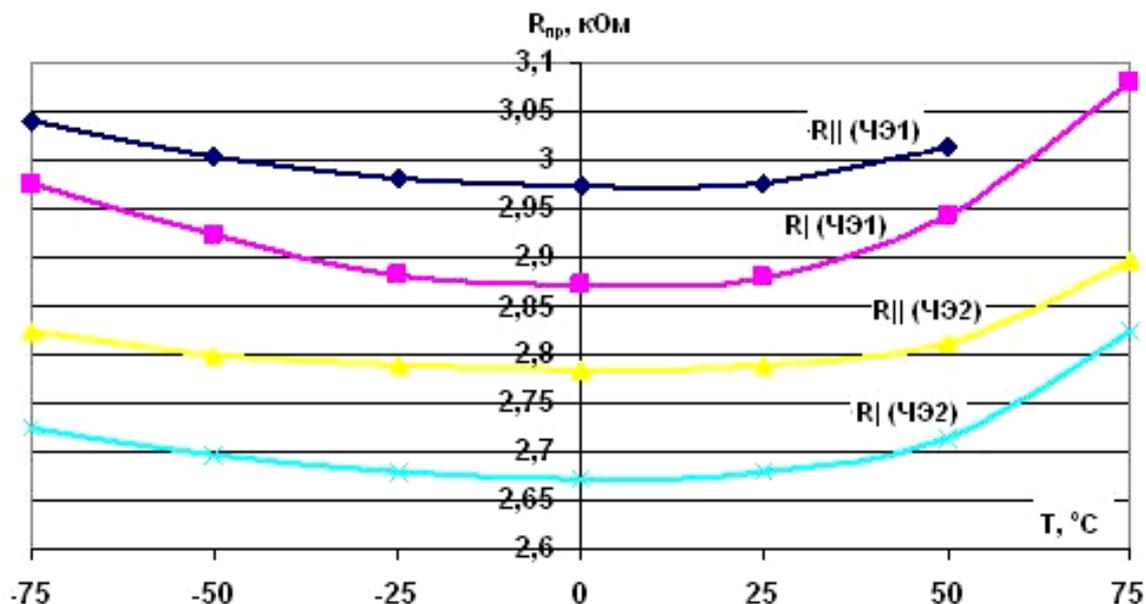


Рисунок 4.15 - Температурные зависимости сопротивления пьезорезисторов ДДТ-1

Исследовались нагрузочные статические характеристики ДДТ-1, путем подачи на него давления и измерения выходного сигнала с занесением полученных результатов в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты проведения нагрузочных испытаний датчиков ДДТ-1

| Давление, кгс/см ² | Выходной сигнал $U_{\text{вых}}, \text{мВ}$ | | | | | | | |
|----------------------------------|---|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| | 1 цикл | | 2 цикл | | 3 цикл | | 4 цикл | |
| | прям. ход | обрат. ход | прям. ход | обрат. ход | прям. ход | обрат. ход | прям. ход | обрат. ход |
| 0 | 0,27 | 0,29 | 0,29 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 |
| 4 | 10,8 | 10,77 | 10,76 | 10,8 | 10,78 | 10,78 | 10,8 | 10,8 |
| 8 | 20,71 | 20,69 | 20,71 | 20,71 | 20,72 | 20,7 | 20,68 | 20,73 |
| 12 | 31,01 | 30,99 | 30,98 | 31 | 31 | 30,98 | 30,97 | 30,98 |
| 16 | 41,17 | 41,17 | 41,14 | 41,17 | 41,15 | 41,18 | 41,18 | 41,18 |
| 20 | 51,27 | 51,31 | 51,29 | 51,28 | 51,31 | 51,28 | 51,31 | 51,28 |
| 24 | 61,2 | 61,17 | 61,18 | 61,18 | 61,2 | 61,16 | 61,17 | 61,19 |
| 28 | 71,54 | 71,56 | 71,58 | 71,55 | 71,56 | 71,53 | 71,57 | 71,54 |
| 32 | 81,61 | 81,6 | 81,62 | 81,61 | 81,65 | 81,62 | 81,64 | 81,64 |
| 36 | 91,49 | 91,5 | 91,51 | 91,49 | 91,49 | 91,51 | 91,51 | 91,49 |
| 40 | 101,67 | 101,63 | 101,63 | 101,64 | 101,63 | 101,63 | 101,63 | 101,66 |

Таблица 4.3 - Контроль выходных характеристик канала температуры ДДТ-1 при нулевом давлении (Начальное выходное напряжение U_{0t})

| Номер датчика | Нач. вых. сигнал, мВ | Выходное напряжение U_{0t} при температурах, мВ | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|---|-----|-----|-------|-------|--------|---------|--------|--------|
| | | -50 | -30 | -10 | 0 | +20 | +40 | +60 | +80 | +100 |
| ДДТ-1 | -13,90 | 287 | 189 | 107 | 72,78 | 3,160 | -62,44 | -119,14 | -168 | -212 |
| ДДТ-1-03 | -15,91 | 356 | 227 | 131 | 40 | -4,21 | -76,34 | -147,7 | -200,8 | -248,0 |

Таблица 4.4 - Контроль выходных характеристик канала температуры ДДТ-1 при максимальном давлении (Выходной сигнал при $P_{пред}$)

| Номер датчика | Вых. сигнал при $P_{пред}$, мВ | Выходное напряжение $U_{предt}$ при температурах, мВ | | | | | | | | |
|---------------|---------------------------------|--|-----|-----|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | | -50 | -30 | -10 | 0 | +20 | +40 | +60 | +80 | +100 |
| ДДТ-1 | 19,40 | 324 | 225 | 142 | 106,92 | 36,65 | -30,42 | -87,89 | -138 | -183 |
| ДДТ-1-03 | 43,40 | 442 | 305 | 200 | 70 | 56,1 | -21,99 | -99,4 | -156,6 | -207,6 |

Основная погрешность ДДТ-1, определенная на основании таблицы 4.2 составила значение $\gamma_0 = 0,186\%$.

Наряду калибровкой канала давления и снятия его нагрузочных характеристик, исследовался канал температуры, а также взаимовлияние каналов друг на друга.

1. Испытаниям подвергались экспериментальные образцы датчика давления и температуры ДДТ-1 в количестве 2 шт. (обозначение и диапазон измерений приведены в таблице 4.3), прошедшие приемо-сдаточные испытания.

Таблица 4.5 – Технические характеристики ДДТ-1

| Индекс датчика | Обозначение | Количество | Диапазон измерений | |
|----------------|-------------|------------|--------------------|---------------------|
| | | | МПа | кгс/см ² |
| ДДТ-1 | 1 | 1 | 0÷0,5 | 0÷5 |
| ДДТ-1-03 | 2 | 1 | 0÷4 | 0÷40 |

2. Объем и методика испытаний

Из всего объема испытаний, которым подвергались образцы датчиков, отметим самые интересные с точки зрения возможности одновременного измерения давления и температуры. Рассмотрим полученные при этом результаты.

1 Электрическое сопротивление между каналом давления и температуры $R_{из}$ в нормальных климатических условиях, составляет не менее 3МОм.

2 Начальный и номинальный выходные сигналы канала давления при нулевой номинальной нагрузке составил соответственно 1,5 мВ и 100 мВ.

3 Для канала температуры начальное выходное напряжение $U_{0t} = 14$ мВ при НКУ и отсутствии давления изменяется от 400 мВ при минус 70°С до минус 250 мВ при +120°С.

4 Для канала температуры выходной сигнал при $P_{\text{пред}} = 19,4$ мПа U_t изменяется от 426 мВ, при минус 70°C до минус 221 мВ при +120 °С.

5 Температурный коэффициент напряжения (ТКН) канала температуры составляет 3,34 мВ/°С.

4.5. Методы и средства испытания датчиков пульсаций давления

Для корректного моделирования воздействия внешней среды в условиях функционирования любых датчиков, следует подвергать их одновременному воздействию нескольких факторов, например вибрациям и температуре, пульсациям давления и виброускорениям и проч.

К сожалению, такое комплексное воздействие требует сложной и дорогостоящей аппаратуры и испытательных стендов, имеющих значительные габариты, при этом они, как правило, все зарубежного производства [122, с. 179]. Типичными представителями комплексной испытательной аппаратуры являются установки комбинированных испытаний японской фирмы «IMV согр.», которые позволяют задавать одновременно несколько воздействий, например, вибрацию, удары, температуру и влажность. Такое мультипликативное воздействие позволяет, с одной стороны, значительно сократить время испытаний, а, с другой стороны, получить более объективную информацию по функционированию испытуемого изделия в реальных условиях. Проведение совмещенных испытаний требует значительных затрат и может быть оправдан или при значительных объемах изготавливаемой продукции, например, при производстве автомобилей, или при проведении длительных испытаний дорогостоящей, сложной продукции, например, двигателей, турбин, летной техники и проч. На практике экономически целесообразным является аддитивный подход, когда изделие или прибор подвергается последовательным испытаниям.

Одним из особых типов ДФВ являются пьезоэлектрические датчики пульсаций давления, в которых в качестве ЧЭ является конструктивно последовательно, а электрически параллельно соединенный набор пьезоэлектрических пластин, объединенных в единый пакет. При этом особенностью датчиков пульсаций давления является то, что они измеряют малое переменное давление на уровне высокого статического. При этом амплитуда переменного давления составляет от 1% до 10% от уровня статического давления (рисунок 2.3). Кроме того, особенностью принципа действия пьезоэлектрических датчиков пульсаций давления (ПЭ ДПД) является то, что статическая составляющая давления у них «отфильтровывается» и не воспринимается [123, с. 14; 124]. Такая особенность ПЭ ДПД делает невозможной их градуировку, калибровку и поверку традиционным способом при помощи грузопоршневых манометров, контроллеров и калибраторов, предназначенных для калибровки и поверки датчиков статических давлений.

Для оценки метрологических характеристик ПЭ ДПД используется методика, основанная на воспроизведении переменного давления в квазистатическом режиме на низкой частоте (40-50 Гц), при помощи

гидравлического пульсатора – рисунок 4.16 [125, 126]. Амплитуда воспроизводимого давления измеряется специальным кварцевым пьезодатчиком – рисунок 4.17. Рассмотрим кратко устройство и принцип действия основных узлов калибровочного стенда: пульсатора и датчиков.

В корпусе 4 размещена на пружинах 6 манометрическая пара, состоящая из поршня 2 с инерционным грузом 3 и цилиндра 1. Через боковой штуцер от гидравлического пресса подается масло, заполняющее полость А и каналы Б, по которым давление $P_{ст}$ передается на эталонный и поверяемый датчики.

Своим основанием 5 пульсатор закрепляется на столе вибростенда. При колебаниях стола поршень также совершает колебания относительно цилиндра и воздействует на жидкость в каналах Б, в результате чего на датчики воздействует одно и то же давление, состоящее из статического $P_{ст}$ и переменного, амплитуда, частота и форма которого определяются параметрами колебаний стола вибростенда. Зная чувствительность эталонного датчика, можно определить амплитуду переменного давления, возникающего в пульсаторе. Регулируя амплитуду и частоту колебаний вибростенда, изменяют соответственно и параметры пульсаций давления на фоне статического давления, тем самым, простым способом моделируя воздействия натуральных пульсаций давления, возникающих на испытательных стендах или в узлах или агрегатах различных изделий.

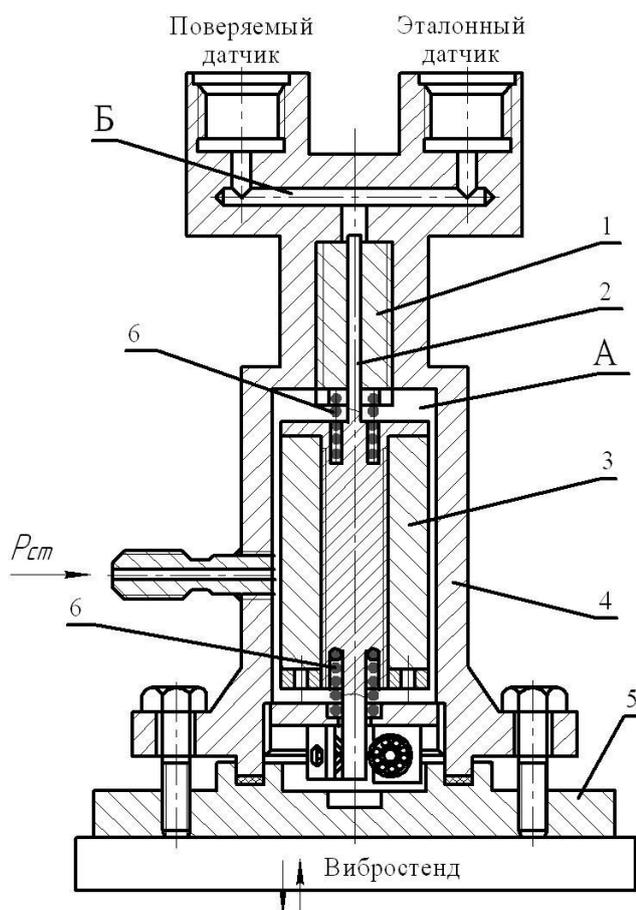


Рисунок 4.16 - Пульсатор для поверки датчиков пульсаций давления

Эталонный кварцевый датчик (рисунок 4.17) состоит из корпуса 1, в котором установлен чувствительный элемент (ЧЭ), состоящий из параллельно соединенных кварцевых дисков 2. Также размещен конденсатор 3, параллельно подключенный к ЧЭ. Для подключения датчика служит высокочастотный разъем 4.

За счет высокого внутреннего сопротивления кварца и применения встроенного конденсатора постоянная времени разряда датчика увеличена до примерно 2-х минут, что позволило градуировать эталонный датчик в статическом режиме на грузопоршневом манометре.

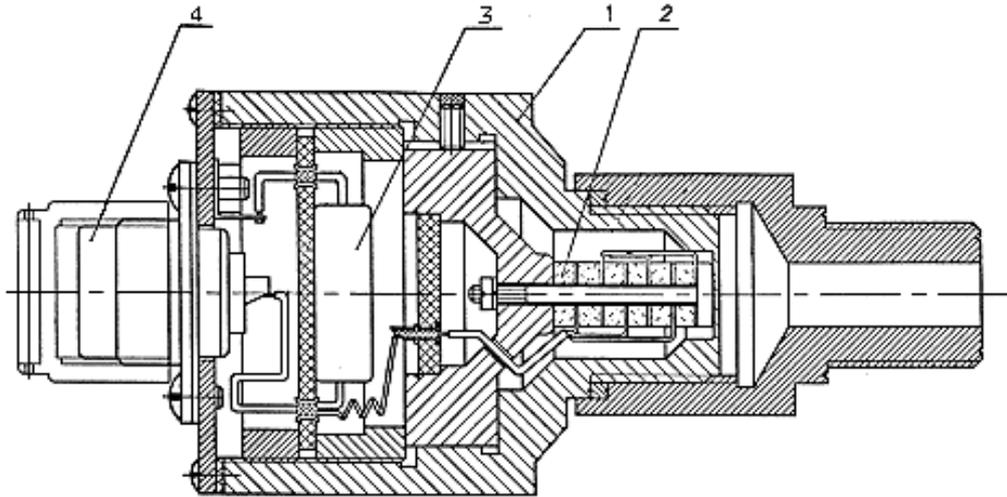


Рисунок 4.17 - Кварцевый датчик пульсации давления

Принятая при этом блок-схема испытательного стенда с использованием пульсатора (рисунок 4.16) и эталонного кварцевого датчика (рисунок 4.17) представлена на рисунке 4.18.

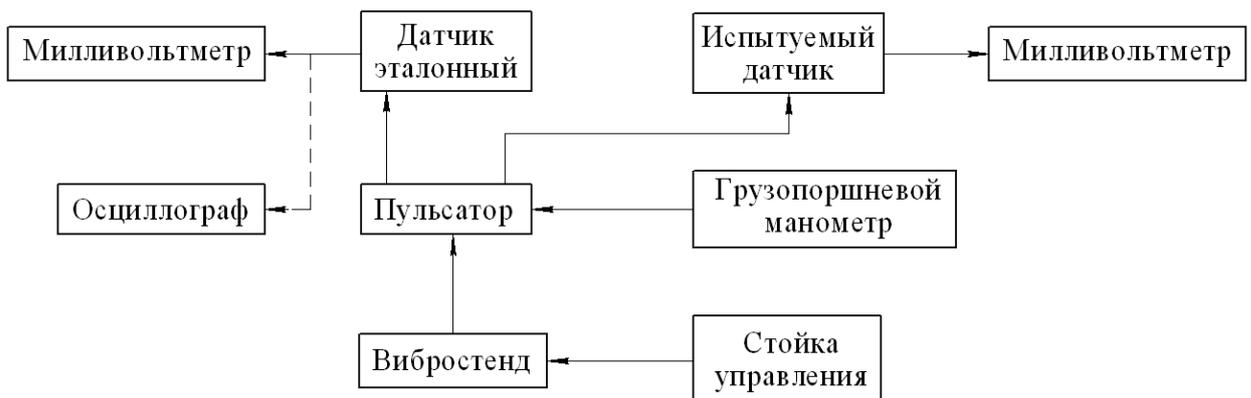


Рисунок 4.18 - Блок-схема испытательного стенда для градуировки датчиков быстропеременных давлений

Данное оборудование и методика калибровки и поверки успешно применяются при производстве большинства типов пьезоэлектрических датчиков быстропеременного давления, предназначенных для использования в различных областях промышленности [122, с. 177; 123, с. 15].

Что касается зарубежных фирм, работающих в данном направлении, можно отметить такие, как «Kistler» [127] и «PCB» [128]. Эти фирмы применяют методику градуировки своих пьезоэлектрических датчиков в режиме одиночных импульсов давления или ступенчатого нагружения давлением с использованием эталонного датчика.

Достоинством такого метода является простота и небольшие габариты генераторов импульсного давления по сравнению с методом испытания в квазистатическом режиме. Однако реализация импульсного метода осложняется необходимостью применения прецизионных дорогостоящих приборов для точного измерения одиночных электрических импульсов, приходящих с датчика. Такие приборы появились сравнительно недавно. Это многоканальные цифровые запоминающие осциллографы, например, мод. TDS 220 фирмы «ТЕКТРОНИК», США.

Примером является схема градуировки, которая применяется на фирме «Kistler», где наряду с импульсным генератором давления используется и гидравлический пресс (рисунок 4.19).

Преимущества этого метода по сравнению с традиционным – гораздо большая производительность градуировки и возможность автоматизации процессов регистрации и обработки результатов градуировки.

Кроме того, появляется возможность создания портативных поверочных установок, что будет полезным для потребителей ПЭД быстропеременных давлений.



Рисунок 4.19 - Система калибровки пьезодатчиков фирмы «Kistler»

Выводы по 4 разделу

1. Разработаны конструктивные и технологические решения в области МЭД давления и температуры, которые включают топологию ЧЭ, конструкции ИМ, микромеханические технологии неразъемного соединения кремния с изоляторами, позволившие создать ряд многофункциональных ЧЭ, ИМ и МЭД.

2. Предложены методики экспериментального определения динамических свойств УЭ, а также методы и средства испытания датчиков пульсаций давления на их основе, которые позволили определить и исследовать основные динамические характеристики датчиков.

3. Выбрано метрологическое обеспечение испытания совмещенных датчиков давления и температуры и представлены результаты испытания ЧЭ, ИМ и самих совмещенных датчиков, доказавшие адекватность разработанных математических моделей.

4. Рассмотрены особенности метрологического обеспечения, используемого при создании интеллектуальных датчиков давления и температуры, на основе чего были предложены схемы многофункционального программно-аппаратного испытательного стенда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие выводы по результатам диссертационных исследований

В настоящее время по мере развития и внедрения последних достижений автоматике, цифровой техники в системы управления и контроля увеличивается важность сбора первичной информации о состоянии всего объекта и отдельных его агрегатов и блоков. Именно этими задачами и занимаются ДФВ, на долю совокупного измерения давления и температуры приходится порядка 45-55 % измерений ФВ. Кроме того, температура часто является лишь косвенным параметром, применяемым при основных измерениях других параметров. Так, при измерениях расхода газа и жидкостей измерение температуры является обязательным, так как на ее величину вносится поправка. При некоторых методах измерения именно температура является основной контролируемой величиной: тепловые расходомеры, термокаталитические газовые ячейки, датчики влажности и проч. В связи с этим, было показано, что разработка датчиков, одновременно измеряющих давление и температуру в экстремальных условиях эксплуатации, является очень востребованным направлением.

Анализ литературных и патентных источников показал, что данной тематикой занимаются в основном зарубежные фирмы и научные коллективы и ученые, включая такие как Эндэво, Кулайт (США), Мида, Метран, Сигнал (Россия). В Казахстане же нет собственного производства датчиков, поэтому используются только импортные. Но оснащение новых или модернизируемых производств в нефтехимии, нефтедобычи и трубопроводной системы импортными датчиками нецелесообразно ввиду их высокой стоимости.

В процессе выполнения диссертации были учтены и исследованы факторы воздействия внешних факторов на чувствительные структуры ДДТ, которые приводили к снижению надежности, прочности, увеличению погрешности за счет генерации механических и тепловых деформаций в узлах и элементах датчиков, которые очень трудно измерить и учесть.

Ввиду дороговизны зарубежных лицензионных программ моделирования структур и элементов датчиков были использованы инженерные модели, основанные на апробированных на практике уравнениях механики, сопромата и теории прочности.

По результатам диссертационного исследования:

- проведены исследования по выбору совместимых физических методов преобразования давления и температуры в электрическую величину, в результате которых в качестве базовых были выбраны пьезорезисторный и терморезистивный эффекты;
- разработаны и исследованы уровневые физико-математические модели элементов и структур совмещенных ДДТ;
- разработаны алгоритмы и программы моделирования полупроводниковых ЧЭ;

- исследованы динамические характеристики (резонансные частоты, диапазон частот, погрешность и проч.) упругих элементов различной конфигурации;
- разработаны и апробированы на практике новые универсальные топологии и конструкции ПЧЭ с деформационными и термозависимыми сенсорными элементами;
- предложено метрологическое обеспечение испытаний ДДТ;
- изготовлены экспериментальные образцы МЭД и проведены их испытания.

Впервые разработана и внедрена эффективная методика компенсации механических и тепловых напряжений с помощью пленочных компенсаторов, формируемых на ЧЭ.

Оценка полноты решений поставленных задач

В результате диссертационной работы выполнены все поставленные задачи:

- проведен анализ условий и режимов эксплуатации и влияние внешних дестабилизирующих факторов на характеристики ДФВ;
- исследованы и выбраны совместимые методы преобразования давления и температуры в ЧЭ МЭД;
- разработаны конструкции ЧЭ и ИМ совмещенных ДДТ;
- исследованы вопросы электрофизической, конструктивной и информационной совместимости компонентов ДДТ;
- разработаны алгоритмы и программы математического моделирования структур совмещенных ДДТ;
- изготовлены и испытаны экспериментальные образцы ДДТ.

Рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов

Для обеспечения импортозамещения, повышения конкурентоспособности и возможности изготовления датчиков на малых предприятиях, целесообразно внедрение модульных конструкций при конструировании и производстве ДФВ. Применение такой концепции позволит за короткое время организовать производство высокотехнологической отечественной конкурентной продукции и создать новые рабочие места, в том числе для молодежи.

Оценка технико-экономической эффективности внедрения

Предлагаемая в диссертационной работе методика разработки и освоения производства нового поколения модульных многофункциональных датчиков требует минимальных затрат на подготовку производства. Это объясняется тем, что основные модули датчиков могут быть получены по кооперации, а окончательная сборка и настройка датчиков производится с использованием стандартного общедоступного оборудования и приборов. Модульные ЧЭ и ИМ, а также электронные блоки изготавливаются серийно и их стоимость невелика, в отличие от датчика, что позволяет получать высокую прибыль от продажи готовых датчиков и очень быстро окупить все затраты.

Проведенный технико-экономический анализ внедрения совмещенных датчиков (приложение В) показал их высокую эффективность и быструю окупаемость.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области

Выполненный в диссертационной работе анализ научных и патентных источников, теоретические и практические разработки, а также исследования в области приборостроения, позволяют сделать вывод о соответствии работы современному научно-техническому уровню. Полученные результаты, выдвигаемые в работе гипотезы и положения дополняют известные фундаментальные данные и нашли свое прикладное применение в решении измерительных задач.

Работы ученых и практиков в области датчиков, таких, как Панич А.Е., Стучебников В.М., Распопов В.Я., Михайлов П.Г., Eller E.E., Jaffe H., Jackson R.G., Fraden J., Kurtz A.D. нашли широкое применение в измерительной технике и приборостроении.

Но, в связи с расширением сфер применения ДФВ, возникла необходимость создания ряда совмещенных датчиков давления и температуры, устойчивых к воздействию экстремальных внешних факторов (ВФ), в частности, температуры, агрессивной среды, вибраций и ускорений. Такие ВФ характерны для глубоких нефтяных скважин, авиации, ракет-носителей и проч. Данные вопросы или недостаточно подробно освещены в современных источниках, или их реализация требует значительных затрат на технологическое оснащение, например, изготовление ЧЭ на основе широкозонных полупроводников (карбид кремния, алмаз) требует колоссальных затрат на материалы, принципиально новые технологии и оборудование.

Приведенные результаты диссертационных исследований обоснованы и объективны, имеют научный интерес, практическую значимость и ценность, перспективность ввиду возможностей внедрения в реальное производство.

Результаты диссертационной работы нашли свое применение в научно-методических разработках учебного процесса ПФ МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ) Пенза и Карагандинского государственного индустриального университета, в НИР ООО «НПЦ «КИТ», г. Пенза, что подтверждается соответствующими актами внедрения в учебный процесс, а также рекомендуются к внедрению в приборостроительное производство.

Научная новизна и оригинальность работы определяется оригинальностью методики компенсации погрешностей и математических моделей ЧЭ и ИМ, а также новизной предлагаемых в работе новых конструктивно-технологических решений, направленных на повышение качества датчиков.

Научная новизна диссертационной работы:

- проведены исследования по анализу и выбору совместимых физических методов преобразования давления и температуры с учетом экстремальных условий эксплуатации;

- разработаны алгоритмы и программы моделирования и оптимизации УЭ и ЧЭ;

- предложены новые конструктивно-технологические решения по оптимизации топологии и выбору совместимых функциональных материалов;

- разработаны и апробированы новые конструкции модульных ПЧЭ с деформационными и термозависимыми сенсорными элементами;

- впервые предложена методика и разработаны модели пленочных компенсаторов.

Разработанные методики и модели применимы для:

- создания совмещенных датчиков различных физических величин: давления и температуры, давления и вибраций, влажности и температуры;

- модернизации существующих датчиков путем встраивания дополнительного канала измерения температуры;

- изготовления модульных датчиков, помещаемых в корпуса различной конфигурации.

Реализация данных возможностей в значительной мере расширяет сферы применения ДФВ, включая коммунальное хозяйство, энергетику, нефтяную и газовые отрасли, нефтехимию.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Энциклопедия АСУ ТП. <https://www.bookasutp.ru>. 05.06.2016.
- 2 Матрица цифровых сенсоров - электронная система сканирования параметров давления следующего поколения // Контрольно-измерительная техника. – М.: Энергоатомиздат, 1997. - С. 13-14.
- 3 Пневмопреобразователь многоканальный ППМ. Руководство по эксплуатации. КРУГ. 421831.001РЭ. – Пенза: КРУГ, 2002. - 45 с.
- 4 Датчики теплофизических и механических параметров. Справочник: в 3 т. / под общ. ред. Ю.Н. Коптева. - М.: ИПРЖ, 1998. - Т. 1. – 458 с.
- 5 Джексон Р.Г. Новейшие датчики. Справочник / пер. с англ. - М.: Техносфера, 2007. - 380 с.
- 6 Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / пер. с англ. - М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
- 7 Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.
- 8 Гармаш В.Б., Егоров Ф.А., Коломиец Л.Н., Неугольников А.П., Поспелов В.И. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Спецвыпуск «Фотон-Экспресс» - Наука. – М.: ФЭ, 2005. - №6. – С. 128-140.
- 9 Гуляев Ю.В., Никитов С.А, Потапов В.Т., Чаморовский Ю.К. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы // Спецвыпуск «Фотон-Экспресс» - Наука. - М.: ФЭ, 2005. -№6. - С. 114 – 127.
- 10 Громов В.С. Многофункциональный датчик для электронных систем сбора данных // Электроника: Наука, технология, бизнес. - 2006. - №5. С. 96-101.
- 11 Пат. 2091578 Российская Федерация, МПК8 G01K7/16. Способ измерения давления и температуры одним датчиком и устройство для его осуществления / Коловертнов Ю. Д., Коловертнов Г. Ю. и др.; заявитель Уфимский Государственный нефтяной технический университет. – № 1995 128278/14; заявл. 04.10.95; опубл. 27.09.97, Бюл. № 5.
- 12 Пат. 2145064 Российская Федерация, МПК8 G01L9/12, G01K7/34. Датчик давления и температуры и способ его изготовления / Казарян А.А.; заявитель Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. - № 98115608/28, заявл. 13.08.1998; опубл. 27.01.2000, Бюл. № 7.
- 13 Пат. 7421905 B2 US, G01L 1/24. Optical sensor with co-located pressure and temperature sensors / Paul S. Zerwekh, Daniel C. Blevins, Clark D. Boyd, Brooks Childers. - № 10/570049, заявл. 17.03.2005; опубл. 28.02.2006.
- 14 Пат. 2002/0059827 A1 US, G01F 1/68. Combined flow, pressure and temperature sensor / Leif Smith. - № 10/022361, заявл. 20.12.2001; опубл. 23.05.2002.
- 15 Ключев И.В. Новые технологии и приборы для измерения давления и температуры жидких и газовых сред // «ИСУП». – Рязань: ОАО «Теплоприбор», 2012. - № 4 (40). – С. 32-33.

- 16 Волоконно-оптические датчики / под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
- 17 Михайлов П.Г. Стабильность микроэлектронных датчиков и технологий (монография) / Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. - 232 с.
- 18 Тиняков Ю.Н., Милешин. С.А., Андреев К.А., Цыганков В.Ю. Анализ конструкций зарубежных прототипов датчиков давления [Электронный ресурс] // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». - 2011. – № 9. <http://technomag.edu.ru/doc/219081.html>. 17.06.16.
- 19 Михайлов П.Г. Микроэлектронные датчики, особенности конструкций и характеристик / Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 6. - С. 38-41.
- 20 Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White. MEMS Mechanical Sensors. – Boston, London: Artech House, Inc, 2004. – P. 270.
- 21 Каталог продукции фирмы Kulite. <https://www.kulite.com>. 20.08.16.
- 22 Шапонич Д., Жигич А. Коррекция пьезорезисторного датчика давления с использованием микроконтроллера // Приборы и техника эксперимента. – 2001. - № 1. - С. 54-60.
- 23 Михайлов П.Г. Микроэлектронный датчик давления и температуры // Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2003. - № 11. - С. 29-31.
- 24 ГОСТ Р 8.673 – 2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. – Введ. 2010-12-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2009. – 8 с.
- 25 ГОСТ Р 8.734 - 2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля. - Введ. 2012-09-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2011. – 20 с.
- 26 Михайлов П.Г. Экспериментальное исследование совмещенного датчика давления и температуры // Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2003. - № 12. - С. 27-29.
- 27 Каталог продукции фирмы NXP. <https://www.nxp.com>. 05.09.16.
- 28 Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е.П. Осадчего. - М.: Машиностроение, 1979. – 480 с.
- 29 Баясилова З.А. Методы преобразования силовых параметров в многофункциональных датчиках // Сборник научных трудов международной конференции «Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта 2019» (РИНЦ). - Днепр: НТУ «ДП», 2019. – С. 129-138.
- 30 Клокова Н.П., Лукашник В.Ф., Воробьева Л.М. Тензодатчики для экспериментальных исследований. – М.: Машиностроение, 1972. - 152 с.
- 31 Технология тонких пленок. Справочник: в 2–х томах / под ред. Мейсэла. – М.: Мир, 1972. - Т. 1. – 664 с.

- 32 Ваганов В. И. Интегральные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
- 33 Пивоненков Б.И., Стучебников В.М. Проектирование полупроводниковых интегральных тензочувствительных структур // Приборы и системы управления. - 1976. - № 1. - С. 20-21.
- 34 Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. - Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
- 35 Тихоненков В.А., Тихонов А.И. Теория, расчет и основы проектирования датчиков механических величин / Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. - 452 с.
- 36 Михайлов П.Г., Ожикенов К.А., Касимов А.О., Аналиева А.У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2015. - № 3 (164). - С. 184-193.
- 37 Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи). Уч. пособие для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1983. - 320 с.
- 38 Кривоносов А.И. Полупроводниковые датчики температуры. - М.: Энергия, 1974. - 184 с.
- 39 Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ. Справочник / Изд. 5-е, пер. и доп. - СПб.: Машиностроение, 2002. – 409 с.
- 40 Михайлов П.Г. Микромеханические устройства и приборы. Учебное пособие. - Пенза: Информационно-издательский центр ПГУ, 2007. - 174 с.
- 41 Bayasilova Z.A., Baktybayev M.K., Mikhaylov P.G. Combined temperature and pressure sensors. // Materiály XIII Mezinárodní vědecko - praktická conference «Aktuální vymoženosti vědy - 2017». – Praha: Publishing House «Education and Science», 2017. - Volume 6. – P. 43-47.
- 42 Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем. Учебное пособие. - Томск: ТУСУР, 2006. – 154 с.
- 43 Петров К.С. Радиоматериалы, радиокомпоненты и электроника. - СПб: Питер, 2003. – 511 с.
- 44 Агеев О.А., Мамиконова В.М., Петров В.В. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. - Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. - 153 с.
- 45 Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учеб. пособие. - М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
- 46 Викулин Н.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. - М.: Радио и связь, 1990. - 264 с.
- 47 Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем / изд. 4-е, перераб. и доп. - М.: Энергия, 1977. - 672 с.
- 48 Митрофанов О.В., Симонов Б.И., Коледов Л.А. Физические основы функционирования изделий микроэлектроники. - М.: Высшая школа, 1987. – 168 с.
- 49 Малюков С.П., Механцев Е.Б. Микросистемные сенсоры температуры. Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 50 с.

50 Михайлов П.Г., Мокров Е.А. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. - № 4. - С. 204–213.

51 Баясилова З.А., Бактыбаев М.К., Михайлов П.Г., Шайханова А.К.. Модификации поликремниевых пленок и повышение чувствительности тензорезистивных структур высокотемпературных датчиков давления // Вестник Государственного Университета имени Шакарима города Семей. – Семей, 2016. - № 4 (76). - 1 том. – С. 7-11.

52 ГОСТ Р 8.585-2001. Государственная система обеспечения единства измерений. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Введ. 2002-07-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2001. – 107 с.

53 Материалы микроэлектронной техники / под ред. В.М. Андреева. - М.: Радио и связь, 1989. - 350 с

54 Шершегор Т.Д., Стрельцова Н.П. Пленочные пьезоэлектрики. - М.: Радио и связь, 1986. – 136 с.

55 Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. - М.: Техносфера, 2006 - 628 с.

56 Речицкий В.И. Акустоэлектронные компоненты. - М.: Советское радио, 1987. – 262 с.

57 Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание с помощью тензоров и матриц. - М.: Мир, 1967. - 385 с.

58 Баясилова З.А., Михайлов П.Г., Фадеев Е.Д., Шайханова А.К. Новый подход к разработке и изготовлению датчиков физических величин // Вестник Государственного Университета имени Шакарима города Семей. – Семей: 2019. - № 1 (85). – С. 3-6.

59 Земляков В.Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении / под ред. Панича А. Е. - Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2009. - (Пьезоэлектрическое приборостроение; т. 5). - 180 с.

60 Казаков В.Г. Тонкие магнитные пленки // Соросовский образовательный журнал. – 1997. - № 1. - С. 107-114.

61 Филачев А.М., Тришенков М.А., Таубкин И.И. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. - М.: Физматкнига, 2011. - 448 с.

62 Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. - М.: Машиностроение, 1981. - 392 с.

63 ГОСТ 8.256-77. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. – Введ. 1978-07-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1977. – 10 с.

64 Мокров Е.А. и др. Оценка и обеспечение динамических свойств датчиков механических величин. Учебн. Пособие. - М.: МГ"УЛ, 2001. - 48 с.

- 65 Тихонов А.И., Тихоненков В.А., Мокров Е.А. Упругие элементы датчиков механических величин. Учебное пособие. – Ульяновск: Изд-во УЛГТУ, 1998. - 120 с.
- 66 Конюхов А.В. Основы анализа конструкций в ANSYS. Учебное пособие. - Казань: Изд-во КазГУ, 2001. - 102 с.
- 67 Гультаев А. К. Визуальное моделирование в среде MATLAB. Учебный курс. - Спб.: ПИТЕР, 2000. - 430 с
- 68 Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. - СПб.: БХВ-Петербург, 2005. - 800 с.
- 69 Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. - Спб: Питер, 2002. 528 с.
- 70 Амелина М.А., Амелин С.А. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap 8. - М.: Горячая линия-Телеком, 2007. - 464 с.
- 71 Пачкория О.Н. Начертательная геометрия и инженерная графика. Пособие по выполнению лабораторных и практических работ в системах Компас-График и Компас 3D. В 2х частях. – М.: МГТУ ГА, 2001. - 184 с.
- 72 Тревис Д. LabVIEW для всех. - М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2004. – 544 с.
- 73 Кошелев В. Excel 2007. Эффективное использование. - М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008 - 544 с.
- 74 Алексеев Е.Р. Решение задач вычислительной математики в пакетах Mathcad 12, MATLAB 7, Maple 9. - М.: ИТ Пресс, 2006. – 496 с
- 75 Грановский В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1984. – 224 с.
- 76 Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 1985. – 474 с.
- 77 ГОСТ 8.009-84. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. – Введ. 1986-01-01. - М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 1984. – 26 с.
- 78 Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. - М.: Высш. шк., 1972. - 451 с.
- 79 Туричин А.М., Новицкий П.В., Левшина Е.С. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. - Л.: Энергия, 1975. – 576 с.
- 80 Баясилова З.А., Бактыбаев М.К., Михайлов П.Г., Шайханова А.К. Моделирование мембранного датчика давления // Вестник Государственного Университета имени Шакарима города Семей. – Семей, 2016. – Т. 1, № 4 (76). – С. 68-71.
- 81 Богуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. - Ростов на Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – (Пьезоэлектрическое приборостроение; т. 3). - 346 с.
- 82 Bayassilova Z.A., Mikhailov P.G., Fadeyev E.D. Mathematic modeling of resilient members of physical quality sensors // Materiály XV mezinárodní vědecko – praktická conference «Efektivní nástroje moderních věd -2019». – Praha: Publishing House «Education and Science», 2019. - Volume 13. - P. 55-63.

83 Антонец И.В., Терешенок А.П. Методы расчета и моделирования упругих элементов. Учебное пособие. - Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 121 с

84 Ожикенов К.А., Михайлов П.Г. и др Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2014. - № 6. - С. 27-34.

85 Михайлов П.Г., Лапшин В.И., Сергеев Д.А. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2013. - № 5. - С. 128–133.

86 Tabarestani M.S., Ganji B.A. Analytical Analysis of Capacitive Pressure Sensor with Clamped Diaphragm // International Journal of Engineering. - 2013. – Vol. 26 – P. 297-302.

87 Haisheng San, Zijun Song, Xiang Wang, Yanli Zhao, Yuxi Y.U. A Novel Piezoresistive Pressure Sensor for harsh environment applications // Optics and Precision Engineering. – 2012. - Vol. 20, № 3. – P. 252-260.

88 Баясилова З.А., Бактыбаев М.К., Михайлов П.Г., Шайханова А.К. Разработка математических моделей чувствительных элементов микроэлектронных датчиков // Вестник Государственного Университета имени Шакарима города Семей. – Семей, 2016. - №4 (76). – С. 64-68.

89 Баранский П.И., Клочков В.П., Потыкевич И.В. Полупроводниковая электроника. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1975 - 704 с.

90 Игнатъева Е.В., Махайлов Ю.А., Тимошенко С.П. О проектировании мембраны с жестким центром кристаллов кремниевых тензопреобразователей на давления от 0,025 до 25 МПа // Нано- и микросистемная техника. - 2010. - № 2. - С. 24-31.

91 Михайлов П.Г., Ожикенов К.А., Айтимов М.Ж. Инженерные модели компонентов датчиков физических величин // Труды XII Международной научно-практической интернет-конференции «Молодежь. Наука. Инновации». - Пенза: Издательство ПКИТ ФГБОУ ВО «МГУТУ» им. К.Г. Разумовского (ПКУ), 2016. - С. 191-196.

92 Полякова А.А. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. - М.: Энергия, 1979. - 168 с.

93 Чернышов А.А. Основы надежности полупроводниковых приборов и интегральных схем. - М.: Радио и связь, 1988. – 256 с.

94 Михайлов П.Г., Ожикенов К.А. Механические и тепловые деформации в микромеханических структурах сенсорных элементов // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан Серия физико-математическая. – 2014. - № 4. - С. 163-168.

95 Михайлов П.Г., Айтимов М.Ж., Баясилова З.А., Хабай А. Моделирование деформаций в микроэлектромеханических структурах измерительных преобразователей // Материалы региональной молодежной научной конференции «Молодежные инициативы в науке, образовании, культуре» / под общ. ред. Т.И. Шукшиной. – Саранск: ФГБОУ ВО

«Мордовский государственный педагогический институт имени М.Е. Евсевьева», 2016. - С. 558-563.

96 А.с. 626374, МКИ G 01 L 1/22. Чувствительный элемент преобразователя неэлектрических величин / П.Г. Михайлов, В.В. Богонин, А.К. Матвеев; опубл. 30.09.1978, Бюл. № 36 (45).

97 Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. Справочник. - М.: Радио и связь, 1991. - 528 с.

98 Михайлов П.Г. Синтез информационно-энергетических моделей датчиков // Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. - 2003. - № 3. - С. 37-40.

99 Михайлов П.Г., Кабдолдина А., Баясилова З.А., Джунусова, Д., Сагындык Э., Машир Г. Анализ и синтез структурных моделей многозвенных измерительных преобразователей // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы: сб. науч. ст. III Ежегод. межвуз. студ. науч.-практ. конф. / под ред. Л.Р. Фионовой, А.В. Дурина (РИНЦ). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. - С. 73-75.

100 Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешности результатов измерений. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 304 с.

101 Мурашкина Т.И. Амплитудные волоконно-оптические датчики автономных систем управления. Монография / Т.И. Мурашкина, В.И. Волчихин. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. Ун-та, 1999. - 188 с.

102 Михайлов П.Г., Кабдолдина А., Баясилова З.А., Джунусова Д., Сагындык Э., Машир Г. Вопросы моделирования емкостных измерительных модулей и чувствительных элементов датчиков давления // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы: сб. науч. ст. III Ежегод. межвуз. студ. науч.-практ. конф. / под ред. Л.Р. Фионовой, А.В. Дурина (РИНЦ). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. - С. 76-78.

103 Narayanaswamy M., Joseph Daniel R., Sumangala K., Antony Jeyasehar C. Computer aided modeling and diaphragm design approach for high sensitivity Silicon-on-Insulator pressure sensors // Measurement – 2011. - № 44. – P. 1924–1936.

104 Хузягулова К.Л. Применение емкостного датчика для определения температуры тела // Сб материалов III МНК «Технические науки: проблемы и перспективы». - СПб.: Свое издательство, 2015. - С. 36-40.

105 Малюков С.П., Механцев Е.Б. Микросистемные сенсоры температуры. Учебное пособие. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 50 с.

106 Guo S., Guo J., Ko W.H. A monolithically integrated surface micromachined touch mode capacitive pressure sensor // Sensors and Actuators A. - 2000. - №. 80. - P. 224–232.

107 Chitra A, Ramakrishnan Y. Design optimization of piezoresistive Multi MEMS Device for lubricating system // Advances in Natural and Applied sciences. – 2014. - Vol 8. – P. 76-84.

108 Виглеб Г. Датчики. - М.: Мир, 1989. - 196 с.

109 French P.J. Polvsilicon: a versatile material for Microsystems // Sensors and

Actuators. - 2002. – Vol. 99. - P. 3-12.

110 Юзова В.А. Актуальные проблемы современной электроники и нанoeлектроники. Курс лекций. - Красноярск: ИПК СФУ, 2009 – 220 с.

111 Bayasilova Z., Mikhailov P., Baktybayev M., Tatiyeva M., Seidildayeva A. Multi-functional sensors for control systems and monitoring // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. - Volume 9. - Issue 13. - P. 959–967. - Article ID: IJMET_09_13_101.

112 Михайлов П.Г., Федосеев Н.Н., Бактыбаев М.К., Баясилова З.А., Хабай А., Скотников В.В., Соколов А.В., Чернецов М.А. Материаловедческие вопросы разработки микроэлектронных датчиков. Часть 1. Функциональные материалы // Молодежь. Наука. Инновации (Youth.Science.Innovation): Труды XII Международной научно-практической интернет-конференции / под ред. И.В. Палаткина, Н.А. Виноградовой. - Пенза: Издательство ПКИТ ФГБОУ ВО «МГУТУ» им. К.Г. Разумовского (ПКУ), 2016. - С. 208-213.

113 Коноплев Б.Г., Лысенко И.Е. Компоненты микросистемной техники. Часть 1. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – 117 с.

114 Уорден К. Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение.: Москва: Техносфера, 2006. – 224 с.

115 Михайлов П.Г., Цибизов П.Н. Модификация материалов микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. – 2003 – № 6 - С. 65-68.

116 Михайлов П.Г. Формообразующие процессы создания микромеханических устройств // Микросистемная техника. – М.: 2003. – № 7. – С. 10-13.

117 Герасименко Н.Н., Пархоменко Ю.Н. Кремний – материал нанoeлектроники. – М.: Техносфера, 2007. – 352 с.

118 Алейников А.Ф., Гридчин В.А., Цапенко М.П. Датчики (перспективные направления развития). Учеб. пособие / под ред. проф. М.П. Цапенко. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. - 176 с.

119 Михайлов П.Г. Модификация материалов микроэлектронных датчиков. - Приборы и Системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2003. - № 5. - С. 43-46.

120 Михайлов П.Г. Материалы микроэлектронных датчиков // Новые промышленные технологии. – 2003. - № 3. - С. 19-21.

121 Пат. 1431470 Российская Федерация, G01L 1/04. Тензометрический преобразователь давления и способ его изготовления / Михайлов П.Г., Козин С.А. и др. – № 4168398/10; заявл. 29.12.86; опубл. 20.08.96, Бюл. № 36.

122 Михайлов П.Г., Мокров Е.А. Особенности метрологического обеспечения современных датчиков пульсаций давления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. - № 5 (130). - С. 174–179.

123 Балашов К.Е., Донис Е.О. Совершенствование методов градуировки пьезоэлектрических преобразователей быстропеременных давлений // Мир измерений. – 2007. - № 8. - С 13-15.

124 Михайлов П.Г., Бактыбаев М.К., Баясилова З.А., Хабай А., Айтимов

М.Ж., Кабдолдина А.О., Машир Г., Гусманова М.С. Вопросы контроля пьезоэлектрических чувствительных элементов датчиков физических величин // Молодежь. Наука. Инновации (Youth.Science.Innovation): Труды XII Международной научно-практической интернет-конференции / под ред. И.В. Палаткина, Н.А. Виноградовой - Пенза: Издательство ПКИТ ФГБОУ ВО «МГУТУ» им. К.Г. Разумовского (ПКУ). - 2016. - С. 185-191.

125 Михайлов П.Г., Мокров Е.А. Особенности испытания пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений // Сборник трудов международной молодежной научной конференции «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Анапа, 2013.- С. 131-134.

126 Михайлов П.Г., Соколов А.В. Диагностика элементов и узлов пьезоэлектрических датчиков динамических давлений // Сб. статей Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах. – Пенза: Издательство ПГУ, 2013. - С. 245-248.

127 Каталог продукции фирмы «Kistler». <https://www.kistler.com/en>. 13.08.2017.

128 Каталог продукции фирмы «PCB Piesotronics». <https://www.pcb.com/> 05.09.2017.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

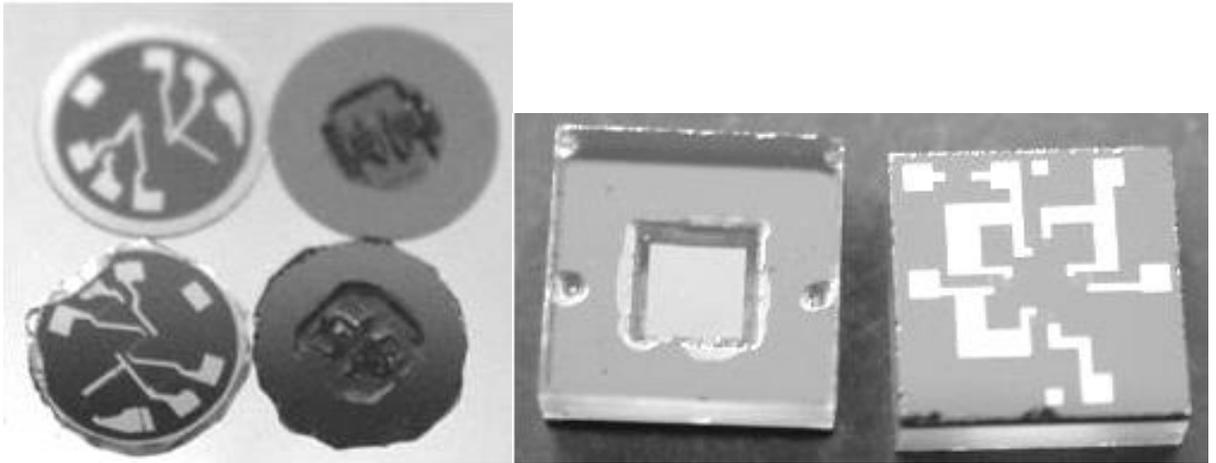
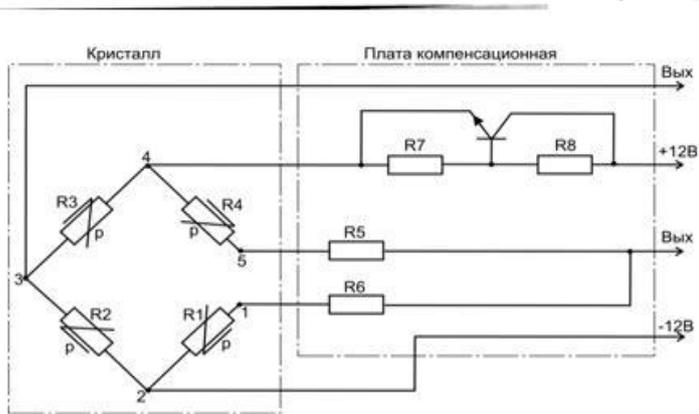
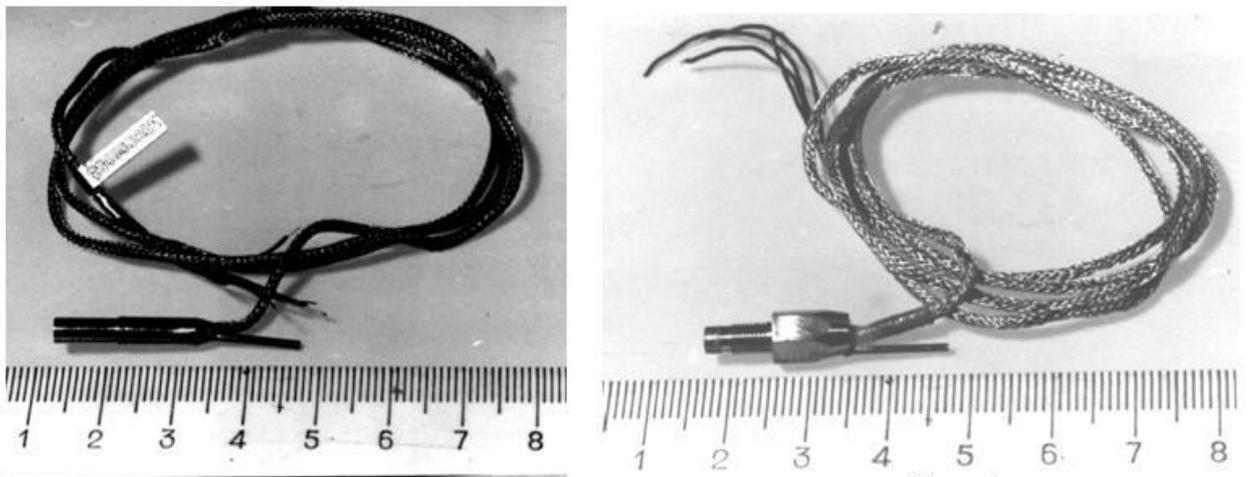
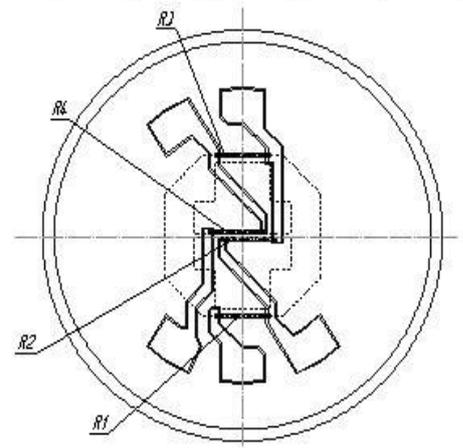


Рисунок А1 - Фотографии ПЧЭ ДДТ



а



б

Рисунок А2 - Совмещенные датчики давления и температуры типа ДДТ-1 (а) и ДДТ-1-03 (б)

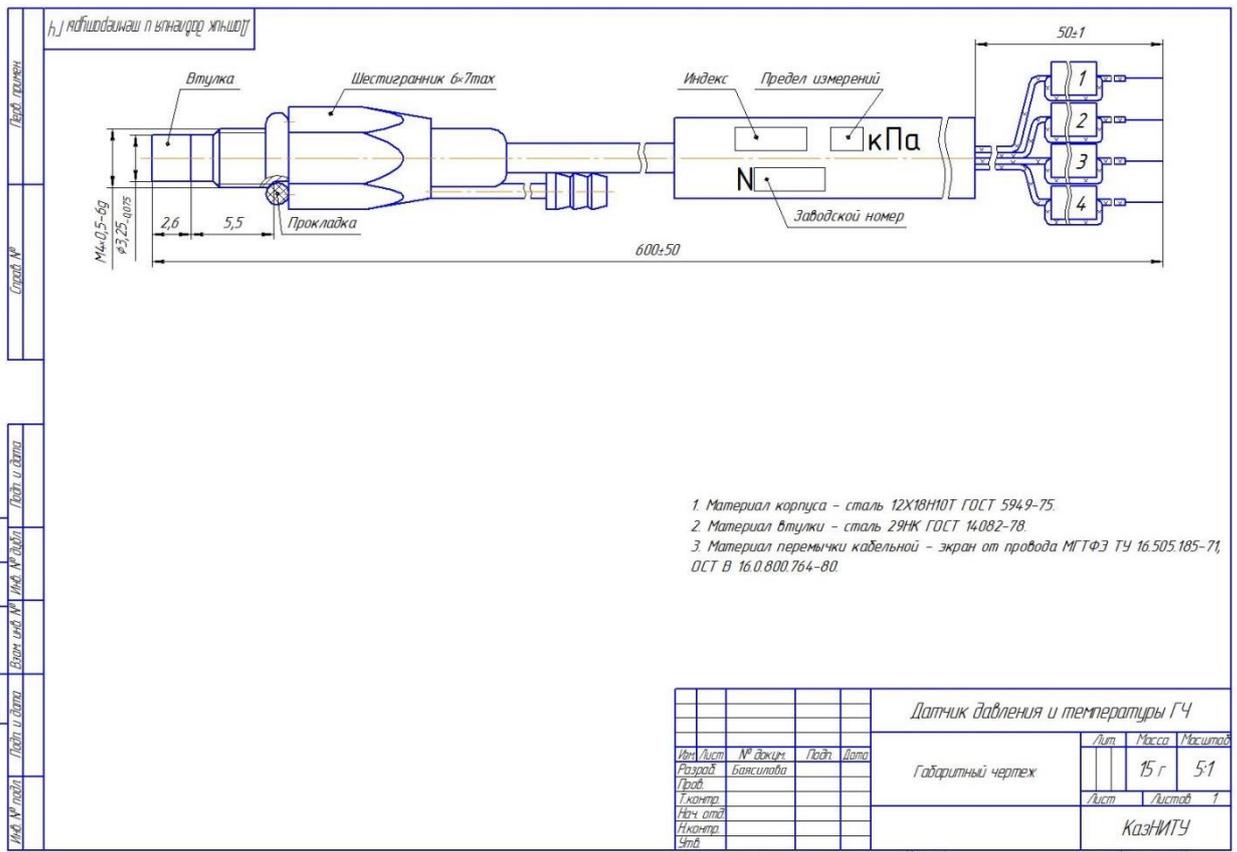


Рисунок А3 - Габаритный чертеж датчика давления и температуры ДДТ-1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Листинг программы расчета прочностных характеристик ПЧЭ датчика ДДТ-1 с использованием программы Mathcad 7 Pro

Исходные данные:

| | |
|--|--|
| $m_{km} := 10^{-6} \cdot m$ | |
| $U_{пит.} := 12 \cdot V$ | – напряжение питания |
| $U_{вых.} := 720 mV$ | – номинальный выходной сигнал |
| $\frac{U_{вых.}}{U_{пит.}} = 60 \cdot \frac{mV}{V}$ | – выходной сигнал |
| $H_{кр.} := 0.3 \cdot mm$ | – толщина исходной кремниевой пластины |
| $l_{max} := 1 \cdot mm$ | – место расположения центров тензорезисторов |
| $a_{ц.} := 1 \cdot mm$ | – размер жесткого центра |
| $K_L := 32.7$ | – коэффициент тензочувствительности продольных тензорезисторов |
| $K_t := -14.5$ | – коэффициент тензочувствительности поперечных пьезорезисторов |
| $E := 1.301 \times 10^{11} Pa$ | – модуль Юнга |
| $\epsilon_{раб.} := \frac{2 \cdot U_{вых.}}{U_{пит.} \cdot (K_L - K_t)}$ | |
| $\epsilon_{раб.} = 2.542 \times 10^{-3}$ | – рабочая деформация |
| $P := 0.2 \cdot MPa$ | – измеряемое давление |

Расчет ПЧЭ с плоской мембраной:

$$f1(h_M, a_M) := a_M \cdot \sqrt{\frac{0.835 \cdot \left(0.038 \ln \left(\frac{a_M}{h_M} \right) - 4.326 \right) + 0.093}{1 - 0.324 \cdot e^{-0.339 \cdot \frac{H_{кр.}}{h_M}}}} \cdot P - h_M$$

$$f2(h_M, a_M) := \left(2 \cdot l_{max} \cdot \frac{1.01}{1 + 1.224 \cdot e^{-0.381 \cdot \frac{2 \cdot l_{max}}{h_M}}} \right) - a_M$$

$$a_M := 2 \cdot l_{max}$$

$$h_{M.} := \frac{a_{M.}}{5} = 400 \cdot \text{mkm}$$

Given

$$f1(h_{M.}, a_{M.}) = 0$$

$$f2(h_{M.}, a_{M.}) = 0$$

$$v := \text{Find}(h_{M.}, a_{M.})$$

$$h_{M.} := v_1$$

$$a_{M.} := v_2$$

$$a_{M.} = 2.02 \cdot \text{mm} \quad - \text{размер мембраны}$$

$$h_{M.} = 23.2 \cdot \text{mkm} \quad - \text{толщина мембраны}$$

$$\frac{a_M}{h_M} = 87 \quad - \text{отношение размера стороны мембраны к ее толщине}$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Краткое технико-экономическое обоснование создания совмещенных модульных датчиков

| Наименование затрат | Стоимость |
|---|---------------------------|
| Модуль давления РМ 29 ООО «Оникс-электро», г. Москва | 30 долл x 360 тг=10800 тг |
| Микросхема для компенсации и организации аналогового (по напряжению или 4...20 мА) или цифрового выхода фирма «ZMD», Германия | 1800 тг |
| Печатная плата с постановкой элементов поверхностным монтажом | 1200 тг |
| Разъем типа 2 РМ завод «Эликон», г. Казань | 1200 тг |
| Изготовление корпуса | 1,5 н/ч x900 тг |
| Изготовление штуцера | 2,0 н/ч x900 тг |
| Сборка | 3,0 н/ч x900 тг |
| Настройка и ПСИ | 2,0 н/ч x900 тг |
| Итого себестоимость датчика давления на основе покупного модуля: тг/шт | 22650 |

Продукция, созданная в процессе выполнения диссертации, отличается конкурентоспособностью, импортозамещающая, имеет высокую добавленную стоимость, доступна для изготовления на малых предприятиях.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО – ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
«КОНТРОЛЬНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»
ООО «НПЦ «КИТ»
г. Пермь, 440068 ул. Кузнецова, д. 23
Тел.: (8412) 31-64-44, 8 (927) 378-8810
spccmt@hotmail.com

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим удостоверяется, что материалы диссертации Бясиловой Зухры Ануаровны «Разработка и исследование совмещенных датчиков давления и температуры» внедрена в инициативную научно-исследовательскую работу, проводившуюся ООО «Научно-производственный центр «Контрольные и измерительные технологии» и АО «ОДК - СТАР» г. Пермь в 2018 году, в части разработки эскизов совмещенного датчика для измерения давления и температуры в модернизированных авиационных двигателях, используемых на газоперекачивающих станциях магистральных газопроводов.

Заместитель генерального директора



А.Р. Ахметов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор
ПКИТ (филиал) ФГБОУ ВО «МГУТУ
им. К.Г. Разумовского (ПКУ)»
д.э.н., профессор
И.В. Палаткин
_____ 2019 г.



А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы Баясиловой Зухры Ануаровны

Комиссия в составе:

председатель комиссии – к.п.н., доцент, заместитель директора по учебно-методической работе ПФ ПКУ ФГБОУ Сайфетдинова М.К.;

члены комиссии:

– к.э.н., доцент Гамидуллаева Л.А. – зав. кафедрой «ПиБИ»;

– к.т.н., доцент Долотин А.И. – зав. кафедрой «Технический сервис и электроэнергетика», составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Баясиловой З.А. на тему «Разработка и исследование совмещенных датчиков давления и температуры», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности 6D071600 – Приборостроение, внедрены в учебный процесс ПКИТ (филиал) ФГБОУ ВО «МГУТУ им. К.Г. Разумовского (ПКУ).

Автором были получены основные научные результаты:

- разработаны алгоритмы и программы моделирования и оптимизации полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) микроэлектронных датчиков (МЭД).

- предложены новые конструктивно-технологические решения по оптимизации топологии и структуры МЭД;

- разработаны и апробированы новые конструкции модульных ПЧЭ с деформационными и термозависимыми сенсорными элементами;

Указанные результаты внедрены в учебный процесс кафедры «Технический сервис и электроэнергетика» при проведении лекционных занятий и лабораторных работ по дисциплине: «Метрология, стандартизация и сертификация», «Мониторинг окружающей среды» и «Датчики и контроллеры» по направлению 430301 – «Сервис» профилю «Сервис в нефтегазовом комплексе».

Внедрение полученных автором научных результатов позволило повысить качество и информативность учебного процесса.

Председатель комиссии:

Члены комиссии



М.К. Сайфетдинова



Л.А. Гамидуллаева



А.И. Долотин

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ИТИ на ПХВ «Карагандинский
государственный индустриальный
университет»



Г.А. Сивякова

сентябрь 2019 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ) результатов НИР в учебный процесс

Мы, нижеподписавшиеся, декан факультета «Энергетика, транспорт и системы управления» Жабалова Г.Г., заведующая кафедрой «Энергетика, автоматизация и вычислительная техника» Ющенко О.А. и научный консультант докторанта целевого гранта Бактыбаев М.К. составили настоящий АКТ ВНЕДРЕНИЯ (ИСПОЛЬЗОВАНИЯ) результатов научных исследований по теме докторской диссертации Баясиловой З.А. «Разработка и исследование совмещенных датчиков давления и температуры» в учебный процесс для подготовки бакалавров по специальности «Автоматизация и управление» и «Электроэнергетика».

Автором были получены основные научные результаты:

- разработаны алгоритмы и программы моделирования и оптимизации полупроводниковых чувствительных элементов (ПЧЭ) микроэлектронных датчиков (МЭД).

- предложены новые конструктивно-технологические решения по оптимизации топологии и структуры МЭД;

- разработаны и апробированы новые конструкции модульных ПЧЭ с деформационными и термозависимыми сенсорными элементами.

Указанные результаты исследований Баясиловой З.А. используются при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам: «Элементы и устройства автоматики», «Метрология и измерения» по специальности 5В070200 – «Автоматизация и управление» образовательной программы «Автоматизация технологических процессов», а также по дисциплинам: «Информационно-измерительная техника», «Автоматизация технологических комплексов» по специальности 5В071800 – «Электроэнергетика» образовательной программы «Электропривод и автоматизация технологических комплексов».

Декан факультета «ЭТиСУ»,
к.т.н., профессор

(подпись)

Г.Г. Жабалова

Зав. кафедрой «ЭАиВТ»,
доктор PhD

(подпись)

О.А. Ющенко

Научный консультант,
к.ф.-м.н., асс. профессор

(подпись)

М.К. Бактыбаев

PhD докторант

(подпись)

З.А. Баясилова