

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.277.01

Повестка дня:

Защита диссертации **Козловым Александром Ипатьевичем**  
на соискание ученой степени *кандидата технических наук*:

**"Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей  
давления"**

Специальности:

**05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и  
систем управления".**

Официальные оппоненты:

**Мокров Евгений Алексеевич** - д.т.н., профессор кафедры  
"Приборостроение" Пензенского  
государственного университета.

**Винокуров Лев Николаевич** - к.т.н., начальник тематической  
комплексной бригады ОАО «Ульяновское  
конструкторское бюро  
приборостроения».

Ведущая организация

- Ульяновский филиал Института  
радиотехники и электроники им. В.А.  
Котельникова Российской академии  
наук, г. Ульяновск.

## ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.277.01

от 28 января 2015 года

на заседании присутствовали члены Совета:

- |     |   |                      |          |                     |
|-----|---|----------------------|----------|---------------------|
| 1.  | Ярушкина Н.Г.,<br>председатель<br>Совета    | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.12 | - технические науки |
| 2.  | Киселев С.К. зам.<br>председателя<br>Совета | д.т.н.,<br>доцент    | 05.11.01 | - технические науки |
| 3.  | Смирнов В.И.,<br>ученый секретарь<br>Совета | д.т.н.,<br>профессор | 05.11.01 | - технические науки |
| 4.  | Афанасьев А.Н.                              | д.т.н.,<br>доцент    | 05.13.12 | - технические науки |
| 5.  | Афанасьева Т.В.                             | д.т.н.,<br>доцент    | 05.13.12 | - технические науки |
| 6.  | Васильев К.К.                               | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.05 | - технические науки |
| 7.  | Дьяков И.Ф.                                 | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.12 | - технические науки |
| 8.  | Крашенинников В.Р.                          | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.05 | - технические науки |
| 9.  | Клячкин В.Н.                                | д.т.н.,<br>профессор | 05.11.01 | - технические науки |
| 10. | Негода В.Н.                                 | д.т.н.,<br>доцент    | 05.13.05 | - технические науки |
| 11. | Сергеев В.А.                                | д.т.н.,<br>доцент    | 05.11.01 | - технические науки |
| 12. | Соснин П.И.                                 | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.12 | - технические науки |
| 13. | Стучебников В.М.                            | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.05 | - технические науки |
| 14. | Ташлинский А.Г.                             | д.т.н.,<br>профессор | 05.13.05 | - технические науки |

Председатель Совета  
д.т.н., профессор

Н.Г. Ярушкина

Ученый секретарь Совета,  
д.т.н., профессор

В.И. Смирнов



Председатель

**Уважаемые коллеги !**

На заседании диссертационного Совета Д212.277.01 из **21** члена Совета присутствуют 14 человек. Необходимый кворум имеем.

Членам Совета повестка дня известна. Какие будут суждения по повестке дня?

Председатель

Утвердить повестку дня? (принято единогласно).

По специальности защищаемой диссертации **05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления"** (технические науки) на заседании присутствуют 5 докторов наук.

Наше заседание правомочно.

Председатель

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук **Козловым Александром Ипатьевичем** по теме: *"Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления"*.

Работа выполнена в Ульяновском государственном техническом университете.

Научный руководитель - **д.т.н., доцент Киселев С.К.**

**Официальные оппоненты:**

**Мокров Евгений Алексеевич** - д.т.н., профессор кафедры "Приборостроение" Пензенского государственного университета.

**Винокуров Лев Николаевич** - к.т.н., начальник тематической комплексной бригады ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения».

Присутствуют 2 оппонента.

Письменные согласия на оппонирование данной работы от них были своевременно получены.

Ведущая организация - **Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Ульяновск.**

Слово предоставляется **Ученому секретарю** диссертационного Совета д.т.н. **В.И. Смирнову** для оглашения документов из личного дела соискателя.

Ученый секретарь

Соискателем **Козловым Александром Ипатьевичем** представлены в Совет все необходимые документы для защиты кандидатской диссертации (зачитывает):

- заявление соискателя;
- копия диплома о высшем образовании (заверенная);
- удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов;
- заключение по диссертации от организации, где выполнялась работа;
- диссертация и автореферат в требуемом количестве экземпляров.

Все документы личного дела оформлены в соответствии с требованиями Положений ВАК.

Основные положения диссертации отражены **Козловым А. И.** в **10** научных работах, в т.ч. в **четырёх** **статьях в изданиях из перечня ВАК**. Соискатель представлен к защите **26.11.2014г.** (протокол №9). Объявление о защите размещено на сайте ВАК РФ **27.11.2014г.**

Председатель

Есть ли вопросы по личному делу соискателя к ученому секретарю Совета? (Нет).

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

Чем объясняется необходимость наличия научного консультанта по специальности? Я не против, только объясните зачем.

д.т.н., доцент Киселев С.К. (научный руководитель)

Дело в том, что Александр Ипатьевич работает в организации, в которой непосредственно разрабатываются и производятся исследованные тензопреобразователи и руководителем которой является Владимир Михайлович. В своей работе ему очень плотно приходилось общаться с Владимиром Михайловичем и становление в научном плане Александра Ипатьевича произошло именно под руководством Владимира Михайловича, при этом создал большой практический задел по работе перед приходом в университет для обучения в аспирантуре и подготовки диссертации.

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

Ясно, спасибо.

Председатель

Есть ли вопросы к **Козлову А. И.** по личному делу? (Нет).

**Александр Ипатьевич**, Вам предоставляется слово для изложения основных положений Вашей диссертационной работы.

## Соискатель

Уважаемый Председатель, члены Ученого Совета, гости, вашему вниманию представляется работа по теме «Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления», выполненная на кафедре «Измерительно-вычислительные комплексы». Современные системы управления технологическими процессами невозможно представить без разнообразных датчиков физических величин. При этом датчики давления относятся к наиболее востребованным. Согласно данным, приводимым в литературе, в большей части применяемых датчиков давления используются тензорезисторные преобразователи (ТП) давления с мембранными упругими элементами (УЭ) чашечного типа. Литературный обзор показал, что при поиске оптимального расположения тензорезисторов (ТР) на поверхности мембран в большинстве случаев исходят из аналитической теории пластин, жестко закрепленных по периферии. Отдельные работы, посвященные численному моделированию напряженного состояния мембран ТП, приводятся без экспериментального подтверждения расчетных данных и носят чисто теоретический характер. Отсутствие такого рода информации на сегодняшний день не позволяет разработчикам ТП и датчиков давления оперативно разрабатывать новые типы приборов и модернизировать имеющиеся под конкретные запросы рынка, а также снизить временные и материальные затраты на разработку приборов. Целью работы является исследование и разработка мембранных ТП давления с улучшенными метрологическими характеристиками (сниженными нелинейностью, вариацией и температурным дрейфом, повышенной чувствительностью) на основе теоретико-экспериментального исследования особенностей распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента и изменения сопротивления ТР под действием давления и температуры. Для достижения указанной цели необходимо было решить ряд задач: 1) Изучение различных теоретических моделей упругих элементов ТП давления, применяемых в описании функционирования ТП давления с мембранами чашечного типа; 2) Выявление отличий результатов расчетов характеристик упругих элементов реальных ТП с распределенными параметрами методом конечных элементов от результатов расчета моделей тонких пластин, жестко закрепленных по периферии и нагруженных давлением, или сосредоточенной силой; 3) Проведение экспериментального исследования распределения изменения сопротивления и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) ТР на поверхности полупроводникового чувствительного элемента (ПЧЭ) для различных конструктивов упругих элементов ТП на основе структур «кремний на сапфире» (КНС); 4) Расчет по полученным экспериментальным данным профилей деформаций механического происхождения на поверхности ПЧЭ для различных конструктивов УЭ ТП; 5) Проверка адекватности математической модели ТП сравнением результатов расчета профилей деформаций в УЭ с полученными из экспериментальных данных; 6) Разработка на основе полученных данных оптимизированных ТП на основе КНС, исследование их метрологических свойств.

На защиту выносятся следующие положения: 1) В упругих элементах чашечного типа при нагружении давлением или силой деформации распространяются за пределы контура мембраны на основании УЭ и на жесткий центр, и чем толще мембрана, тем дальше

они распространяются; 2) Для получения адекватных результатов численного моделирования при расчете профилей упругих деформаций недостаточно учитывать только сам УЭ, а необходимо учитывать весь ТП в целом; 3) В двухслойных мембранах с ПЧЭ на основе КНС на распределение термических напряжений, возникающих после пайки ПЧЭ и определяющих температурные свойства ТП в целом, большой вклад вносит краевой эффект; 4) Размещение ТР на определенном расстоянии от края ПЧЭ позволяет оптимизировать температурные характеристики ТП; 5) Полученные экспериментальные результаты вместе с разработанной математической моделью позволили создать унифицированный ПЧЭ, обеспечивающий максимальную чувствительность и оптимальные метрологические характеристики для одно- и двухмембранных ТП на диапазоны измеряемых давлений от 10 кПа до 200 МПа.

В работе рассматривались одно- и двухмембранные ТП (плакат №4). Нижний диапазон измеряемых давлений у таких одномембранных ТП технологически ограничен минимальной толщиной мембраны, необходимой для обеспечения требуемой чувствительности, и равен примерно 1МПа. Для измерения давлений ниже 1МПа используют двухмембранный конструктив ТП. Изучение научно-технической литературы показало, что до сих пор при проектировании ТП в большинстве случаев используют аналитическую модель ТП давления, представленной на плакате №5, для которой существуют известные выражения для распределения деформаций в мембране. В последнее время при проектировании ТП разработчики активнее стали применять численное моделирование. Анализ различных теоретических моделей ТП давления с мембранными упругими элементами чашечного типа показал, что численная модель с использованием метода конечных элементов дает результаты по распределению деформаций на поверхности УЭ ТП давления принципиально отличающиеся от полученных аналитическим путем (плакат №6). Из представленных данных видно, что чем больше диапазон измеряемых давлений (соответственно больше толщина мембраны УЭ), тем больше это расхождение. Для устранения данной неопределенности в представленной работе было проведено экспериментальное исследование распределения деформаций на поверхности упругого элемента ТП давления чашечного типа. Для этого была разработана методика экспериментального определения распределения радиальных и тангенциальных составляющих деформаций на поверхности круглых мембранных УЭ. Суть методики заключается в следующем: на мембрану исследуемого УЭ напаяется полупроводниковый чувствительный элемент со специальной топологией (плакат №7), состоящей из последовательно соединенных малобазных радиальных и тангенциальных тензорезисторов, расположенных по диаметру мембраны. Экспериментально определялось сопротивление ТР тестовой структуры а также их изменение под действием давления при различных температурах. При этом общая погрешность косвенного измерения сопротивления тензорезисторов не превышала 0,1%. Далее, по известным формулам (плакат №7), определялось распределение деформаций на поверхности упругого элемента ТП. Измерения проводились на экспериментальной установке, структурная схема которой приведена на плакате №8. Объект исследования размещался в термокамеру, в которой задавались стационарные режимы температур с точностью не хуже 1°C. Давление задавалось с помощью эталонного грузопоршневого манометра с точностью 0,005%. Для борьбы с

высокочастотными и синфазными помехами измерительные кабели были изготовлены в виде экранированных витых пар. Для исключения низкочастотных сетевых помех источником питания являлся аккумулятор достаточной емкости с дополнительным стабилизатором напряжения на 5В. Данные с объект исследований через измерительные кабели поступали в систему сбора данных, и далее – по интерфейсу RS-232 в персональный компьютер, где происходила их обработка.

Данные измерений здесь (плакат №9) приведены в виде типичных зависимостей относительного изменения сопротивления радиальных и тангенциальных ТР от расстояния до центра мембраны. Из сравнения экспериментальных данных для одномембранных ТП давления с аналогичными расчетными распределениями, полученными по аналитическим формулам видно, что в реальных ТП условие жесткого заземления, т.е. когда деформации (соответственно и изменения сопротивления ТР) сразу за границей мембраны обращаются в нуль, не выполняется. Также видно, что экстремум чувствительности ТР смещен относительно края мембраны. Как было уже сказано, в работе непосредственно экспериментально определялось сопротивление ТР тестовой структуры а также их изменение под действием давления. Далее, по вышеприведенным формулам определялось распределение деформаций на поверхности упругого элемента ТП. Результаты сравнения расчетных значений радиальных и тангенциальных составляющих деформаций с аналогичными экспериментальными данными рассмотрим на примере одномембранного ТП. Как видно из представленных графиков (плакат №10), уже начиная с нижних пределов измерения зависимости, рассчитываемые по аналитическим формулам, имеют сильное рассогласование с экспериментальными данными. Из рисунка видно, что максимальные расхождения наблюдаются на краю мембраны  $r_0$  и на основании чашки УЭ, причем, чем больше толщина мембраны  $h$ , тем больше расхождение. Это указывает на то, что в реальных ТП условие жесткого закрепления мембраны по контуру не действует. В отличие от классической аналитической модели расчетные распределения деформаций, полученные с помощью численной модели ТП, достаточно хорошо согласуются с распределениями деформаций, полученных экспериментальным путем, значит модель достаточно адекватна.

Для ТП с тензорезистивной схемой, составленных из радиальных и тангенциальных резисторов, справедливо выражение для изменения выходного сигнала ТП под действием давления (плакат №11). Здесь представлены результаты экспериментального определения распределения величины  $\delta$  для одномембранных ТП, представляющего собой относительную чувствительность ТП, в зависимости от расстояния до центра мембраны для случаев с различным отношением толщины  $h$  упругой мембраны к ее радиусу  $r_0$ . Как видно из рисунка, экстремум величины  $\delta$  практически всегда смещен относительно края мембраны. Он находится вблизи края мембраны только при средних ее толщинах. При больших толщинах мембраны – смещается за ее границу и расплывается. Наконец, при достаточной толщине мембраны максимум исчезает. Таким образом, проведенные исследования показывают, что в упругих элементах чашечного типа при нагружении давлением деформации распространяются за пределы контура мембраны на основание УЭ, и чем толще мембрана, тем дальше они распространяются. Ранее, в работе другого исследователя Черницына В.Н. была предложена эмпирическая формула для величины смещения  $\Delta r$

экстремума тензочувствительности  $\delta$  за границу мембраны  $r_0$  (плакат №12). На рисунке приведены результаты экспериментальных измерений смещения  $\Delta r$  максимума величины  $\delta$  при различных толщинах и радиусах мембраны ТП. Там же график, построенный по формуле Черницына В.Н.. Как видно из рисунка, смещение экстремума  $\delta$  зависит не только от толщины мембраны, но и от ее радиуса. Формула Черницына неплохо описывает смещение экстремума  $\delta$  только при одном фиксированном значении  $r_0$ , так что пользоваться ею для практических расчетов топологии тензосхемы при произвольных значениях размеров упругой мембраны нельзя.

Полученные экспериментальные результаты вместе с апробированной математической моделью позволили провести оптимизацию конструкции ТП путем размещения тензорезисторов в зоне максимальной разницы радиальной и тангенциальной составляющих деформаций, определенной по результатам расчета на основе численной модели, апробированной в работе. Сравнительные испытания серийных и оптимизированных ТП показали (плакат №13), что у оптимизированных ТП при сохранении чувствительности нелинейность преобразования уменьшилась в среднем в 1,5 раза, вариация выходного сигнала ТП в среднем снизилась в 5 раз, также значительно уменьшился гистерезис.

В данной работе впервые проведено исследование температурных зависимостей радиальных и тангенциальных ТР на поверхности сапфирового ПЧЭ, питаемого на УЭ чашечного типа из титанового сплава. Если в мостовой тензосхеме, состоящей из радиальных и тангенциальных ТР, сопротивления смежных ТР по-разному изменяются с температурой, то, как следует из формулы (плакат №14), температурная зависимость начального выходного сигнала ТП (при давлении, равном нулю), с учетом экспоненциальной зависимости сопротивлений ТР, определяется разностью ТКС радиальных и тангенциальных ТР. На плакате №14 приведены типичные результаты измерения распределения ТКС радиальных и тангенциальных ТР. ТКС тензорезисторов измерялись до и после пайки тестового ПЧЭ на исследуемую мембрану. Из приведенных данных видно, что в двухслойных мембранах с ПЧЭ на основе КНС на распределение термических напряжений, возникающих после пайки ПЧЭ и определяющих температурные свойства ТП в целом, большой вклад вносит краевой эффект, указывающий на наличие анизотропных термических напряжений. Установлено, что разность ТКС практически не изменяется при изменении отношения толщины упругой мембраны к ее радиусу в широких пределах (от 0,15 до 1,15). Из рисунка также видно, что размещение тензорезисторов на определенном расстоянии от края ПЧЭ позволяет оптимизировать температурные характеристики ТП. На основании данных исследований разработан унифицированный ПЧЭ, обеспечивающий максимальную чувствительность и уменьшенный температурный дрейф нулевого сигнала для одно- и двухмембранных ТП на диапазоны измеряемых давлений от 10 кПа до 200 МПа (плакат №15). Из сравнения статистических данных (объем выборки не менее 10000 шт) по величине температурных дрейфов нулевых сигналов ТП МИДА с серийными и оптимизированными ПЧЭ можно сказать, что благодаря внедрению в производство датчиков ПЧЭ с топологией МД-010 удалось снизить температурный дрейф нулевых сигналов ТП в среднем в 2-3 раза.

Помимо одномембранных ТП, в работе также были исследованы ТП с двухмембранным конструктивом. При проектировании таких ТП также широко используются аналитические уравнения для круглой мембраны, жёстко заземлённой по контуру и нагруженной в центре силой (плакат №16). На данном плакате приведена типичная для двухмембранного ТП зависимость относительного изменения сопротивления радиальных и тангенциальных ТР от расстояния до центра мембраны. На этом же рисунке наряду с экспериментальными данными приведены расчетные распределения аналогичных зависимостей, полученных по аналитическим формулам. Здесь также видно, что как и в случае одномембранных ТП условие жесткого заземления не выполняется и экстремум чувствительности ТР также смещен относительно края мембраны. Распределение ТКС радиальных и тангенциальных ТР в двухмембранных конструктивах имеет свои особенности. Помимо уже указанного краевого эффекта, здесь наблюдается сильное расхождение величин ТКС радиальных и тангенциальных ТР на границе жесткого центра. Из этих данных видно, что для двухмембранного конструктива ТП можно спроектировать ПЧЭ, с тензосхемой, состоящей из ТР, расположенных на границе жесткого центра и на периферии мембраны и ориентированных либо только параллельно, либо только перпендикулярно относительно радиуса УЭ (сонаправленные ТР). В работе разработаны 2 вида ПЧЭ (плакат №17), тензосхема которых составлена только из радиальных ТР, расположенных на границе жесткого центра и на периферии мембраны. Данные сравнительных испытаний серийных и опытных образцов ТП с ПЧЭ МД-009 показывают, что использование данного ПЧЭ с сонаправленными ТР позволяет дополнительно снизить аддитивную погрешность двухмембранных ТП (за счет меньшей разности ТКС у используемых ТР), без изменения остальных метрологических характеристик. Использование второго ПЧЭ с радиально-радиальными ТР (МД-012) совместно с балочным УЭ позволяет повысить чувствительность ТП в среднем в 1.5 раза по сравнению с ТП с мембранным УЭ, что позволяет снизить нижний предел измеряемых давлений. Также за счет меньшей площади ПЧЭ по сравнению с серийным, применение ПЧЭ МД-012 позволяет снизить себестоимость ТП.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые подробно экспериментально исследованы зависимости изменения сопротивления тензорезисторов под действием давления и температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов от расстояния до центра мембраны УЭ чашечного типа для одно- и двухмембранных ТП. Показано, что деформированное состояние УЭ чашечного типа не описывается аналитическими выражениями, справедливыми для круглых мембран, жестко заземленных по контуру. Предложена конструктивная оптимизация ТП, позволяющая значительно повысить их метрологические характеристики. Разработаны новые типы унифицированных ПЧЭ, обеспечивающие уменьшение температурной погрешности нулевого сигнала ТП и снижающие себестоимость изготовления ТП.

Практическая значимость работы заключается: 1) В теоретическом и экспериментальном подтверждении, что широко используемое аналитическое описание распределения деформаций на поверхности мембранного тензопреобразователя давления не соответствует действительности, что деформации распространяются далеко в основание УЭ за границу мембраны, особенно при больших

значениях отношения толщины мембраны к её диаметру; 2) В оптимизации конструкций УЭ тензопреобразователей, благодаря чему удалось снизить нелинейность и вариацию выходного сигнала серийных ТП давления МИДА; 3) В разработке ПЧЭ на основе структур КНС МД-010, использование которого позволило снизить температурный дрейф нулевого сигнала серийных ТП давления МИДА; 4) В разработке ПЧЭ на основе структур КНС МД-012, имеющего в 3,3 раза меньшую площадь в сравнении с серийным ПЧЭ, использование которого позволяет:

- вдвое уменьшить нижний предел измеряемых давлений датчиков давления МИДА (до 1,6–2,5 кПа);
- заменить двухмембранный конструктив ТП на более простой в технологическом плане одномембранный для 4 диапазонов измеряемого давления;
- снизить себестоимость датчиков давления МИДА примерно в 4–6%;

Полученные научные и практические результаты были использованы в ЗАО «Микроэлектронные датчики и устройства» (ЗАО МИДАУС) г. Ульяновск при разработке ТП и датчиков давления МИДА. Разработанный полупроводниковый чувствительный элемент с оптимизированной топологией №МД-010 внедрён в серийное производство тензопреобразователей и датчиков давления в ЗАО МИДАУС с 2010 года. Основные положения диссертационной работы, научные и практические результаты исследований были представлены и получили положительную оценку на различных научно-технических конференциях. По теме диссертации опубликовано 10 работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня российских рецензируемых научных журналов по списку ВАК. Личный вклад автора заключается в выполнении значительного объема теоретических и всех экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку методик экспериментальных исследований, макетных образцов ТП и оснастки для испытаний, выбор необходимого оборудования и проведение исследований, анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов.

Спасибо за внимание, доклад окончен.

Председатель

У кого есть вопросы к соискателю?

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Что касается моделирования. Вы приводили там аналитическую модель, а потом говорите: "...на основе численного моделирования...". Какая программа и какие средства использовались для моделирования? Кто их разработал, или это уже известные компьютерные программы?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Непосредственно численная модель мной не была разработана. Я принимал только участие в отладке и апробировании данной модели. Модель была разработана на предприятии ЗАО "Мидаус" Пироговым А.В. на основе программной системы ANSYS.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

У меня уточняющий вопрос. Вы говорите, что ваши исследования позволили создать унифицированные тензопреобразователи, которые обеспечивают максимальную чувствительность. Обычно унифицированные вещи не обладают максимальными характеристиками по всем параметрам. За счет чего они были унифицированы? Это первая часть моего вопроса. Вторая часть, она тоже уточняющая. Говорите: "...при этом получаются оптимальные метрологические характеристики...". При этом возникает вопрос: по какому критерию оптимизация велась, в каком смысле они оптимальны? Рассматривалась же не одна характеристика, а целая их совокупность.

Соискатель

Спасибо за вопрос. Начну с последней части вашего вопроса. По поводу оптимизации. Под этим предполагалось, это и было заявлено в цели работы, улучшение метрологических характеристик: это снижение нелинейности преобразования, вариации и снижение дополнительной погрешности – температурного дрейфа нулевого сигнала.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Ну в такой постановке вопроса понятно, но вы же говорите, что у вас оптимальные характеристики. Оптимальность всегда предполагает наличие какого-то критерия. Ведь улучшение, это не оптимизация. Или это просто неудачное выражение?

Соискатель

Оптимизация здесь производилась таким образом: получение минимальных указанных выше параметров при максимально возможной величине чувствительности (критерий), т.е. оптимизация у нас производилась таким образом, чтобы тензорезисторы всегда располагались на экстремуме распределения тензочувствительности по поверхности мембранного упругого элемента. При этом у нас получается максимальная чувствительность и при этом же получается минимальная погрешность преобразования, в частности, нелинейность, Например, данные исследования показывают (здесь они приведены не были, но имеются в диссертации), что большинство имевшихся упругих элементов зачастую перегружались из-за того, что тензорезисторы находились не на максимальной разности составляющих деформаций, и соответственно для получения требуемого уровня выходного сигнала мембрану приходилось перегружать, и как следствие появлялась дополнительная вариация.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Я понял по поводу оптимизации одного параметра, а вот что на счет остальных: были ли какие-то другие ограничения в задаче?

Соискатель

Нет, других ограничений не было.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

То есть вы рассматривали монокритериальную задачу?

Соискатель

Да, можно сказать так.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

А в чем унификация? Вы не ответили на часть вопроса.

Соискатель

Да, вернемся к первой части вопроса. Унификация (чувствительного элемента) заключается в том, что один и тот же чувствительный элемент используется в тензопреобразователях на широкий диапазон измеряемых давлений. Он же используется и на одномембранных конструктивах тензопреобразователей, и на двухмембранных: начиная от 10 кПа заканчивая 200МПа.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

То есть унификация в смысле конструктива?

Соискатель

Да, один унифицированный чувствительный элемент используется в сочетании с различными мембранными упругими элементами, что нам в конечном итоге позволяет на тензопреобразователях на различные диапазоны измерения получать требуемый выходной сигнал (имея лишь один тип чувствительного элемента).

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Вернемся к плакату 7, пожалуйста. Тут основы подтверждения всех этих модельных представлений. У вас вот этот чувствительный элемент, оригинальный, вами разработанный – он квадратный, а исследуемая мембрана круглая. Я хотел бы уточнить: откуда взяты эти представленные формулы, вы сами их сочиняли?

Соискатель

Формулы данные мной не выводились, они известные, ссылки на них в диссертации приводились.

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Значит ли это, что кто-то до вас уже подобные эксперименты проводил?

Соискатель

Нет, такие эксперименты не ставились. Данные формулы были получены при решении других задач, но они в полной мере применимы в данной ситуации для расчета деформаций на основе измерения сопротивления тензорезисторов и их изменения под действием давления.

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Я к тому, что при прямоугольной геометрии у вас на каждый резистор будет действовать и радиальная и тангенциальная составляющая деформаций, так или нет? Их ведь надо было как то разделить.

Соискатель

Для того, чтобы получить отдельные компоненты деформации, радиальные и тангенциальные, я уже показывал, здесь (на топологии чувствительного элемента) половина из этой цепочки тензорезисторов имеет радиальную ориентацию по отношению к диаметру мембраны упругого элемента, на которую она напаивается, а другая половина – только тангенциальную, от которых отходят потенциальные выводы. Таким образом, такое расположение тензорезисторов на топологии тестового чувствительного элемента позволяет нам получить эти два компонента деформации.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Они (компоненты деформации) зависимы или независимы?

Соискатель

В данном случае влияние тангенциальной деформации на радиальные тензорезисторы пренебрежимо мало, так же как и влияние радиальной составляющей деформации на тангенциальные тензорезисторы, поэтому мы их считаем независимыми.

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Вы для разных толщин мембран проводили вот эти эксперименты или все-таки на одном конкретном образце конструкции?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Исследованию подвергались различные мембраны: с различными толщиной и диаметром, поэтому получаемые экспериментальные данные я приводил в зависимости от величины отношения толщины к радиусу мембраны. К тому же было показано, что положение экстремума и его смещение относительно края мембраны определяется не только толщиной мембраны упругого элемента, но и ее радиусом, вернее ее лучше описывать в отношении толщины мембраны к ее радиусу.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Александр Ипатьевич, у меня сложилось впечатление, что вы хороший такой экспериментатор: сделали сами экспериментальную установку, располагали различными способами тензорезисторы и другие элементы, ну и оптимизировали в итоге параметры тензопреобразователей. Получили экспериментальные зависимости, увидели как там перемещается чувствительность в зависимости от положения тензорезисторов, прекрасно, нашли хорошую конструкцию. Зачем вам эти математические формулы были нужны, для чего вы их используете?

Соискатель

Здесь все взаимосвязано. Сама экспериментальная часть работы была призвана для того, чтобы, во-первых, проверить расчетные результаты, а при необходимости внести изменения модель, например, части описания физических свойств моделируемых деталей...

д.т.н., профессор Васильев К.К.

А где у вас приведено сравнение расчетных результатов с экспериментом?

Соискатель

Вот, приведено на плакате 10. В работе одной из задач было сравнение величин деформаций, получаемых различными способами. Здесь вот приведены расчетные деформации, полученные из аналитической модели и рассчитанные на основе численной математической модели, и проведено сравнение с деформациями, полученными экспериментальным путем.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

А зачем? У вас же есть эти экспериментальные графики, и выберите там наилучшее положение.

Соискатель

Затем, что мы не ограничиваемся оптимизацией вот только отдельно взятого тензопреобразователя. Для того, чтобы разрабатывать новые типы приборов под новые технические задания, нам нужна адекватная модель.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

То есть вы не будете под новые приборы проводить эксперименты, а возьмете эти модели и будете их использовать? Вопрос конкретный к вам: вы как разработчик при разработке нового тензодатчика будете использовать теорию, которая известна, или все-таки соберете новую экспериментальную установку и будете находить наилучшую конфигурацию расположения всех элементов? Как вы поступите?

Соискатель

В дальнейшем, конечно же, будет использована численная математическая модель, адекватность которой показана в работе. При этом бывают различные ситуации. Например, в случаях, когда быстро нужно оценить какое местоположение тензорезисторов должно быть и какую чувствительность при этом мы получим, можно воспользоваться и экспериментальными характеристиками по распределению экстремума тензочувствительности.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

И все-таки вот эта численная математическая модель, хоть она в чем-то и совпадает с экспериментальными данными, отличия, кстати, приличные от вашего эксперимента, она не учитывает массу вещей, которые имеются: ну там пространство, распределение тепла и другое множество факторов. Неужели вы, как хороший разработчик, будете ее использовать? А вдруг в новом тензодатчике окажется, что эта модель и не применима. Ведь вы же не сделали вывод, что эта модель применима на все случаи жизни: может быть для какой-нибудь овальной структуры все будет по-другому. Значит в случае вашего тензодатчика, который был разработан и внедрен, математическая модель фактически не использовалась, а в диссертации у вас просто было дано подтверждение той модели, которая до вас была разработана. Я правильно вас понимаю?

Соискатель

Не совсем. Отчасти вы правы, но позвольте дать пояснения по данному поводу. Что из себя представляет в данном случае конструктивная оптимизация по снижению температурного дрейфа и при этом обеспечения требуемой чувствительности. Как было в работе показано, величина разности температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов мало зависит от конструктивных параметров упругого элемента. Благодаря этому, мы проектируем новую топологию чувствительного элемента, которая позволяет снизить температурный дрейф нулевого сигнала, и совместно с этим на основании данных численного моделирования изменяем конструкцию упругого элемента (толщину и диаметр мембраны) таким образом, чтобы сместить экстремум тензочувствительности под новое место расположения тензорезисторов.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

А этот экстремум у вас и в теоретической модели тоже есть?

Соискатель

Да, конечно же, есть.

д.т.н., профессор Васильев К.К.

И последний мой вопрос. Откройте, пожалуйста, ваш предпоследний плакат. Здесь приведена научная новизна. Первое:

"...впервые экспериментально исследованы..." может быть это и научная новизна, но, может быть, как то по-другому нужно сформулировать. Может быть получено экспериментальное подтверждение каких-то моделей, расширен класс или еще что-то. Тут не мешало бы вставить что-то из ваших достижений в части достижения цели. Второе: отрицательный результат у нас, конечно же, во все времена – результат. Вот вы показали, что не описывается аналитической моделью. Я думаю, что такая научная новизна она может быть для докторской работы подходит, а для кандидатской – нужна конкретика. Третий и четвертый пункт тоже трудно отнести к научной новизне, потому что это больше подходит под практическую ценность. Мне кажется, вам научную новизну нужно было сформулировать немного по-другому. Я правильно понимаю этот вопрос?

Соискатель

С замечаниями я согласен, новизну, наверно, можно было бы сформулировать немного по-другому.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Вопрос по поводу технологичности. Насколько здесь меняется технологичность? Не получится ли так, что в относительно дешевом технологическом процессе то преимущество, которого вы достигаете, растеряется?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Отвечая на ваш вопрос, я хочу обратиться к статистическим данным, где как раз показан тот разброс параметров, который связан с технологичностью. Из этих данных видно, что не смотря на имеющийся разброс параметров, средние значения оптимизированных тензопреобразователей в 2-3 раза лучше, чем у серийных, причем для многих диапазонов величины даже с учетом разброса не пересекаются.

д.т.н., профессор Смирнов В.И.

Александр Ипатьевич, у нас по этой тематике были защиты и там для уменьшения температурной погрешности использовались различные схемы компенсации с использованием различных резисторов и других элементов. Вы предлагаете нам новую конструкцию, где используются новые чувствительные элементы. Нельзя ли на выходе такого тензопреобразователя поставить микроконтроллер, где все эти температурные зависимости и свойства материалов учесть в виде каких-то расчетных формул? Стоимость при этом увеличится не сильно. Что мешает так сделать?

Соискатель

Спасибо за вопрос. Конечно, использованием микроконтроллеров можно значительно снизить погрешность, в том числе и дополнительную температурную, но здесь ставилась задача уменьшить их в рамках тензопреобразователя, а не в составе датчика, потому

что многие у многих потребителей в различных системах управления требуются не сами датчики, а тензопреобразователи исходными хорошими метрологическими характеристиками. Разработчики систем управления обращаются к нам, чтобы мы разработали только сам тензопреобразователь, а дальнейшей обработкой сигнала с него они занимаются сами, но при этом ставят нам определенные рамки по данным параметрам.

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

Александр Ипатьевич, у меня к вам вот такой вот вопрос. Вы когда говорили об эксперименте, в которой все это проверяли, говорили что точное давление вы измеряете с помощью грузопоршневого манометра. Вот эти манометры они точнее, чем ваши приборы?

Соискатель

Да, конечно же, для проведения эксперимента выбирался эталонный грузопоршневой манометр с точностью гораздо высшей, чем у исследуемых приборов.

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

Ну если они точнее почему бы их не использовать в системах управления, зачем выдумывать новые приборы? В чем их преимущество: они дешевле или еще в чем-то лучше?

Соискатель

Во-первых, грузопоршневой манометр по сравнению с рассматриваемыми тензопреобразователями имеет огромные размеры, поэтому нельзя так вот взять и внедрить его в системы управления. Во-вторых,...

д.т.н., профессор Крашенинников В.Р.

Ну хорошо. Теперь какие же давления измеряются? У вас в исследованиях, я так понял, оно постоянно. Но ведь во всяких трубопроводах, когда там идет подкачка компрессором, давление ведь пульсирует, а все то, что вы нам предлагаете – это для такого постоянного, ровненького давления. Что произойдет с преобразователем и что он будет показывать, вот меня беспокоит, если его поставить на трубопровод, где, например, работает компрессор и создает пульсирующее давление? Достаточно ли у него реакции, чтобы отображать изменение давления? Будет ли он выдавать какие то усредненные данные, будет ли он успевать за пульсациями? Какие там собственные колебания? Вот такие вот вопросы.

Соискатель

Вопрос я понял. В работе исследования проводились при стационарном давлении и стационарных температурах, т.е. мы осознанно ограничивались областью применения общепромышленных

датчиков давления, где рассматриваются медленноменяющиеся или квазистационарные температура и давление. Быстропеременные давления здесь не рассматривались.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Вы в тензопреобразователях анализируете чувствительность. Хотелось бы знать, какие измерительные устройства применялись для определения чувствительности, потому что сами тензопреобразователи имеют погрешность в пределах 10-15%, какой прибор вы использовали?

Соискатель

Такого прибора, о котором вы спрашиваете, отдельно здесь нет. Когда речь касалась тензочувствительности, здесь имелась в виду чувствительность тензорезисторов и выходной сигнал тензопреобразователя, схема которого составлена из данных тензорезисторов. Чувствительность мы здесь оцениваем на основе процентного изменения величины сопротивления тензорезисторов, так как для тензопреобразователей с мостовой тензочувствительной схемой изменение выходного сигнала прямо пропорционально изменению сопротивления тензорезисторов.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Значит мембрана работает в среде турбулентного давления. Если идет процесс нагружения и разгружения мембраны, значит, наверно, возникают гистерезисные явления. По мере работы, по мере течения времени, площадь петли гистерезиса меняется, наверно.

Соискатель

Вообще, конечно, приборы обладают гистерезисом. Также в данных, где я проводил сравнительные испытания (плакат 13), были приведены величины гистерезисов. Опять же было показано, что благодаря проведенной конструктивной оптимизации, удалось снизить и величину гистерезиса. Здесь данные приведены в процентном отношении от чувствительности.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Ну в процессе динамики гистерезиса, там на какой-то частоте в мембране могут возникнуть микротрещины. Скорость развития микротрещин в работе описывалась?

Соискатель

Нет, не описывалась.

Председатель

Есть еще вопросы? (Нет).

**Согласны ли члены Совета сделать технический перерыв?** (Нет) .  
Тогда продолжаем работу.

Слово предоставляется научному руководителю работы **д.т.н. Киселеву Сергею Константиновичу**

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Я думаю, как здесь и было ясно в процессе защиты, Александр Ипатьевич обладает большим практическим опытом. По своему складу он экспериментатор. Когда он пришел к нам на кафедру, он уже принес с собой большую часть своих исследований и положил их в основу вот этой диссертации. С этой точки зрения уже на момент поступления в аспирантуру вопросов на кафедре по его квалификации не возникало. В дальнейшем, в процессе подготовки этой квалификационной работы какие-то вопросы дорабатывались теоретические, вносились какие-то корректировки в положения, которые были представлены. При этом нужно отметить, что те научные дискуссии, которые я с ним проводил как научный руководитель, показали его как сформировавшегося специалиста, который имеет свою точку зрения на данную проблему, на данную работу, которую он сегодня представлял. Даже те предложения, которые я как научный руководитель ему делал, он обдумывал, и недельки через две приводил достаточные аргументы, почему он не согласен, например, развернуть работу больше в теоретическом плане и остаться на том экспериментальном и на том практическом материале, который он хорошо знает и хорошо им владеет. Здесь нужно сказать, что всякая практическая работа хороша. И здесь, я считаю, Александр Ипатьевич сделал хорошую экспериментально-практическую работу, и я как руководитель им очень доволен.

*(Отзыв прилагается) .*

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Надежда Глебовна, а можно задать вопрос научному руководителю?

Председатель

Можно. Пожалуйста, задавайте вопрос.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Если посмотреть список опубликованных работ, то здесь нигде не фигурирует Киселев С.К.. Как он тогда мог быть научным руководителем?

д.т.н., доцент Киселев С.К.

Я уже говорил, что соискатель на кафедру уже пришел с большим практическим материалом, и на тот момент эти статьи уже были опубликованы. И вносить сюда свою фамилию только на основании того, что являюсь его научным руководителем, я посчитал неэтичным. Зачем, если он сам все это сделал.

Председатель

Ну, это говорит только в плюс нашему соискателю. Нормальная такая самостоятельная работа.

**Ученому секретарю Совета** предоставляется слово для оглашения заключения организации, где выполнялась работа и отзыва ведущей организации.

**Ученый секретарь Совета** оглашает заключение организации, где выполнялась работа. Затем зачитывает отзыв ведущей организации.

(Заключение и отзыв прилагаются).

Председатель

На автореферат диссертации поступило 12 отзывов, все они положительные. Согласны ли члены Совета заслушать обзор отзывов или зачитать их полный текст?

Слово для обзора отзывов, поступивших на диссертацию, предоставляется **Ученому секретарю Совета**.

**Ученый секретарь Совета зачитывает обзор отзывов.**

(Отзывы прилагаются).

**1. Новосибирский государственный технический университет.**

Отзыв подписан профессором кафедры «Полупроводниковых приборов и микроэлектроники», д.т.н., заслуженным работником высшей школы **Гридчиным В.А.**

Замечания: автор излишне расширительно обобщает результаты своих измерений. Наличие максимума деформации и его зависимость от геометрии упругого элемента для обычных кремниевых интегральных тензопреобразователей с мембраной, сформированной анизотропным травлением – давно известный факт. Но для рассматриваемого КНС тензопреобразователя, из-за особенностей его конструкции, представленные результаты являются новыми и интересными; аналитическая модель, выбранная для сравнения, не слишком удачна, учитывая размеры упругого элемента. Аналитическая модель – это модель тонких диафрагм. Опять таки известно, что распределение деформации в толстых пластинах отличается от тонких, также как и топология тензопреобразователей; при анализе деформации упругого элемента ни в автореферате, ни в диссертации не обсуждается вопрос об учете предварительной деформации, от соединения КНС пластины с чашечным упругим элементом. А этот вопрос методики измерений и влияет на погрешность определения деформации.

**2. Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации (УВАУГА).** Отзыв подписан профессором кафедры «Управление качеством авиатранспортных систем», д.т.н., профессором **Дмитриенко Г.В.** Замечания: на стр. 9 рис. 1 не подписаны графики, не понятно где  $\varepsilon_r$  и  $\varepsilon_t$ ; в автореферате не указаны причины установленного значительного расхождения результатов аналитических расчетов и экспериментальных данных распространения упругих деформаций мембраны за линию ее жесткого защемления.

**3. ЗАО «Промсервис».** Отзыв подписан к.т.н., **Колесниковым А.Н.**  
Замечание: следует обратить внимание автора на целесообразность использовать систему СИ и измерять температуру в Кельвинах.

**4. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматике им. Н.Л. Духова (ВНИИА).** Отзыв подписан старшим научным сотрудником, к.т.н., **Очеретянским А.Л.**

Замечание: автореферат был бы более информативен, если бы хотя бы на отдельные работы (наиболее значимые), перечисленные на стр. 4 и 11 были бы даны ссылки.

**5. Научно-исследовательский институт физических измерений (ОАО НИИФИ).** Отзыв подписан ученым секретарем и членом научно-технического совета ОАО «НИИФИ», д.т.н., **Папко А.А.** и д.т.н., **Белозубовым Е.М.**, соответственно.

Замечания: отсутствует обоснование возможности распространения экспериментальных результатов, полученных на полупроводниковых чувствительных элементах, на любые тензопреобразователи с упругими элементами чашечного типа; в списке публикаций автора отсутствуют единоличные публикации автора; в списке публикаций автора отсутствуют сведения о защите разработанных соискателем технических решений объектами интеллектуальной собственности: патентами на изобретения, полезными моделями и т.д.

**6. Чистопольский филиал «Восток» казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева.** Отзыв подписан профессором кафедры «Приборостроение», к.т.н., доцентом **Прохоровым С.Г.**

Замечание: из текста не совсем ясно, насколько учтены экспериментальные данные смещения максимума величины  $\delta$  (рис. 4) при оптимизации топологии чувствительного элемента. Особенно интересны результаты оптимизации при больших толщинах мембраны, когда максимум смещается за ее границу.

**7. ОАО «Манотомь».** Отзыв подписан заместителем генерального директора, к.т.н., доцентом **Свинолуповым Ю.Г.**

Замечание: в автореферате было бы полезнее сравнивать характеристики серийных и разработанных ТП не в табличном, а в более наглядном виде.

**8. Ульяновское конструкторское бюро приборостроения (ОАО «УКБП»).** Отзыв подписан начальником расчетно-теоретического отдела, к.т.н., **Сорокиным М.Ю.**

Замечания: отсутствуют описания состояния рассматриваемого вопроса за рубежом и сравнительные характеристики с зарубежными аналогами; в автореферате не показано, какой именно метрологической характеристике отдавалось предпочтение при оптимизации тензопреобразователей, а также не обозначено, какие именно технические решения, кроме размещения тензорезистров, были внедрены для улучшения метрологических характеристик.

**9. Научно-производственное объединение «Марс» (ОАО «НПО «Марс»).** Отзыв подписан главным научным сотрудником, д.т.н., доцентом **Токмаковым Г.П.**

Замечания: в автореферате не приведены обоснования снижения стоимости ПЧЭ в зависимости от уменьшения ее площади (см. стр. 19); в тексте автореферата встречаются нераскрытые аббревиатуры (например ТПЭ, МИДА).

**10. Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С.П. Королева.** Отзыв подписан заведующим кафедрой электротехники, д.т.н., профессором **Гречишниковым В.М.**

Замечание: недостаточно полное описание результатов для тензомодулей, рассчитанных на низкие давления. В частности, не раскрыты причины сдвига экстремума чувствительности к центру тензомодуля, отмечено только его наличие.

**11. Ульяновский государственный университет.** Отзыв подписан ведущим научным сотрудником, д.ф.-м.н., профессором **Светухиным В.В.**

Замечания: в п. 4. научной новизны указан эффект снижения себестоимости изготовления ТП, однако в тексте автореферата не приведен сравнительный технико-экономический анализ производства аналогичных известных и предлагаемых датчиков; пункты 2, 3 и 4 положений, выносимых на защиту, являются очевидными, носят декларативный характер и не несут в своей постановке ни количественных ни качественных утверждений, подтверждающих положение; в главе 4 приводятся результаты, отмечающиеся как новые технические решения, однако новизна указанных результатов не подтверждается патентами на изобретения и полезные модели.

**12. ООО «Авиакомпания Волга-Днепр».** Отзыв подписан директором по качеству, к.т.н., **Дятловым А.Ю.**

Замечания: из автореферата не понятно, является ли автор диссертации разработчиком численной модели с использованием метода конечных элементов, результаты расчета по которой используются в первой главе диссертации; в п. 2 работы сделан общий вывод о справедливости полученного распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента деформациям любого другого упругого элемента чашечного типа. Для корректности вывода требуется указать основные критичные и граничные параметры УЭ, при которых данный вывод действительно справедлив.

#### Председатель

Слово для ответа на замечания по заключению и отзывам предоставляется соискателю.

#### Соискатель

По поводу замечаний ведущей организации. Несмотря на то, что утверждения распространения деформаций за пределы контура мембраны на основе чашки УЭ и получения адекватных результатов численного моделирования распределения деформаций в УЭ только при учете всего ТП в целом, выглядят достаточно очевидными, в открытой литературе нет информации об использовании или учете данных явлений при проектировании УЭ чашечного типа ТП давления. Пояснения по замечанию о личном вкладе автора в разработку математической модели ТП а также наличия необоснованных утверждений были даны в процессе обсуждения.

Теперь относительно отзывов на автореферат.

Часть замечаний по автореферату было связано с тем, что в силу его ограниченности по объему в нем отсутствовали те или иные интересующие данные, которые присутствуют в тексте диссертации.

Замечание по поводу аналитической модели, выбранной для сравнения. Аналитическая модель, рассматриваемая в работе, выбрана по той причине, что на практике во многих случаях по сей день она используется при разработке ТП давления, что подтверждается работами, публикуемыми в открытой литературе, ссылки на которые имеются в списке использованной литературы.

По поводу не указанных причин установленного значительного расхождения результатов аналитических расчетов и экспериментальных данных распространения упругих деформаций мембраны за линию ее жесткого заземления. На самом деле в работе указывалось, что расхождение результатов аналитических расчетов и экспериментальных данных в части наличия деформаций за контуром мембраны на основании чашки УЭ объясняется отсутствием жесткого заземления мембраны.

Замечания о возможности распространения экспериментальных результатов распределения деформаций в мембране УЭ на другие ТП с УЭ чашечного типа. Распространение деформаций за пределы контура мембраны и вид их распределения связаны с конструкцией УЭ чашечного типа, а упругие свойства материала УЭ влияют только на абсолютные значения этих деформаций. Поэтому данные по распределению деформаций в УЭ чашечного типа, полученные в работе на ТП на основе структур КНС, можно применить и для других ТП с УЭ чашечного типа.

С остальными замечаниями я соглашаюсь.

Председатель

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту - **д.т.н. Мокрову Евгению Алексеевичу**. (Отзыв прилагается).

д.т.н., профессор Мокров Е.А.

Добрый день, уважаемые члены диссертационного совета. Разрешите мне представить свой отзыв на диссертационную работу Козлова Александра Ипатьевича. Тема диссертационной работы автора соответствует одному из важных направлений области приборостроения - исследование, проектирование и производство перспективной датчиковой аппаратуры на основе достижений технологии кремниевой микроэлектроники. Среди большого разнообразия датчиков неэлектрических величин датчики давления (ДД) занимают ведущее место по номенклатуре и объемам производства. Они находят широкое применение практически во всех отраслях экономики: энергетика, в том числе атомная, нефтегазодобыча и переработка, авиационная и ракетно-космическая техника, медицина, научные исследования и др.

Мне бы хотелось остановиться на основных задачах, которые должны решаться при создании преобразователей и датчиков давления (ДД), которые существуют постоянно:

- повышение точности измерения;
- повышение быстродействия;
- повышение термоустойчивости в расширенном диапазоне температур, в том числе при нестационарном воздействии;
- снижение энергопотребления, массы, габаритов и стоимости;
- повышение стойкости к воздействию механических факторов (вибрации, удары, акустика);

-повышению стойкости к воздействию электромагнитных полей и радиационным излучениям.

При конструировании и производстве различных ДД наибольшее распространение имеют датчики с тензометрическими преобразователями (ТП) и мембранными упругими элементами (УЭ), на которых размещены тензорезисторы жестко связанные с мембраной.

Одним из типов таких тензопреобразователей являются ТП на основе гетероэпитаксиальных структур кремния на сапфире (КНС), которые обладают целым рядом достоинств (высокая перегрузочная способность, высокое сопротивление изоляции и чувствительность, высокая радиационная стойкость, работоспособность в широком диапазоне температур).

Диссертационная работа А.И. Козлова направлена на теоретические и экспериментальные исследования различных вариантов ТП чашечного типа на основе структур КНС. В работе решаются вопросы улучшения метрологических характеристик по снижению температурных погрешностей и расширению диапазонов измерения. Диссертационная работа А.И. Козлова является актуальной.

Полученные в диссертационной работе теоретические, практические результаты и выводы обоснованы с позиций методологии исследования, основаны на корректных исследованиях основных принципов построения элементов и устройств вычислительной техники и систем управления, теории планирования эксперимента, теории системного анализа и теории теплообмена и проч. При аппаратно-программной реализации исследования диссертантом использованы технологии объектно-ориентированного программирования. Материалы диссертации соответствуют основным научно-техническим положениям проектирования датчиковой аппаратуры, что подтверждено публикациями автора в различных научно-технических изданиях.

Научную новизну диссертационных исследований составляют:

1. Впервые экспериментально исследованы распределения изменения сопротивления тензорезисторов под действием давления и температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов по поверхности УЭ чашечного типа для одно- и двухмембранных ТП.

2. По результатам исследований показано, что для получения адекватных результатов численного моделирования упругих деформаций недостаточно рассматривать только сам УЭ, при расчете профилей УЭ необходимо учитывать весь ТП в целом.

3. По результатам исследований получены конструктивные решения оптимизации ТП, позволяющие значительно повысить их метрологические характеристики.

4. Предложенная в диссертации методика экспериментального определения распределения деформаций в круглой мембране ТП давления имеет научное и практическое значение. Данная методика может использоваться для отладки и проверки адекватности математических моделей ТП давления с УЭ чашечного типа

Наиболее значимыми и новыми результатами работы являются: Теоретические и экспериментальные исследования подтверждены тем, что деформации УЭ распространяются за границы мембраны, особенно при больших значениях отношения толщины мембраны к его диаметру; Полученные автором графики смещения положения экстремума тензочувствительности от края упругой мембраны в зависимости от радиуса и толщины мембраны, могут быть использованы при

проектировании ЧЭ ТП давления, что существенно может снизить трудоемкость их проектирования; Большой объем экспериментальных исследований проведенных на моделях и опытных образцах ТП с получением корректных результатов анализа, подтверждающих основные теоретические положения и выводы диссертации.

Наиболее значимыми практическими результатами работы являются:

1. Оптимизация конструкций УЭ ТП, благодаря чему удалось снизить нелинейность (в 1,2 – 1,6 раза) и вариацию (в 3–5 раз) выходного сигнала серийных ТП.

2. Разработка модифицированного ЧЭ на основе КНС с пониженным дрейфом начального сигнала (в 2,5–3 раза).

3. Разработка полупроводникового ЧЭ (ПЧЭ) на основе КНС имеющего в 3,3 раза меньшую площадь, по сравнению с ранее использованными ПЧЭ, что позволило:

- вдвое уменьшить нижний предел измеряемого давления ДД МИДА;
- заменить двухмембранный измерительный узел на более технологически простой одномембранный.

4. Разработанный автором ПЧЭ с оптимизированной топологией внедрен в серийное производство ТП и ДД, а также может быть применен при разработке и производстве ДД на других смежных предприятиях, например, предприятиях разрабатывающих и изготавливающих ДД для авиационной и ракетно-космической техники.

Материалы диссертации и автореферата изложены квалифицированно, логично, грамотным литературно-техническим языком. Диссертация сопровождается достаточным количеством хорошо оформленного иллюстрированного материала. Следует отметить, как положительную сторону использования автором при оформлении диссертации современных графических редакторов.

К диссертационной работе имеется несколько замечаний:

1. Гл. 1. Нет обоснования выбора металлического материала мембраны и корпуса ТП, в сравнении с другими материалами, на пример, элинварными сплавами.

2. Стр. 53 Рис. 2.1., стр. 89, рис.44. Нет обозначения топологических элементов на тестовой структуре и серийных ПЧЭ (контактные площадки, тензорезисторы).

3. Не приведены значения мощности рассеивания тензорезисторов, удельной тепловой нагрузки, температуры и соответственно допустимого тока нагрузки.

4. стр.80 рис. 38 Вывод о том, что распределение разности ТКС тензорезисторов практически не зависит от толщины чашки ПЧЭ. может быть справедливым только при воздействии стационарных температур.

5. Нет данных по номинальным значениям коэффициентов тензочувствительности и относительного изменения сопротивлений тензорезисторов на исследованных топологиях ПЧЭ.

6. Нет расчетов и экспериментальных исследований по динамическим характеристикам т ТП, что снижает практическую ценность работы.

Отмеченные недостатки не снижают научной ценности и общие положительные оценки оппонируемой диссертации.

Положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достоверны и отличаются новизной.

Диссертация Козлова А.И. является законченной научно-исследовательской работой, а результаты научно-технических решений

и экспериментальных исследований вносят значительный вклад в развитие проектирования и производство датчиковой аппаратуры – важного направления приборостроения.

По основным научным результатам диссертации опубликованы 10 работ, в том числе 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК. Разработанные модели, конструкции ПЧЭ и методики исследований внедрены в серийное производство датчиков на предприятии ЗАО «Мидаус».

Автореферат в достаточной мере отражает содержание диссертации.

На основании изложенного считаю, что диссертация Александр Ипатьевича Козлова по актуальности, научно-техническому уровню и практическому значению соответствует «Положению о порядке присуждения ученой степени» утвержденный Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления».

И в заключении хотелось бы отметить: во-первых, (еще раз подчеркну) очень большой объем экспериментальных исследований. Такой диссертации, как у Александра Ипатьевича, такого большого объема экспериментальных исследований, такой корректной аналитики я еще не встречал; во-вторых, что хотелось бы отметить – это внедрение результатов диссертации в серийное производство. Сегодня тоже, к сожалению, не так часто встречается.

#### Председатель

Соискателю предоставляется слово для ответа на замечания оппонента.

#### Соискатель

С большинством замечаний я согласен. Единственное, что хотелось бы пояснить, это выбор металлического материала мембраны. На момент выполнения работы единственным материалом, с которым жестко можно было соединить ПЧЭ на основе КНС, был титан, так как смачивание сапфира при пайке происходит только за счет транспорта титана из материала УЭ, растворенного в припое, к сапфировому ПЧЭ. Поэтому в работе в качестве материала мембранного УЭ рассматривались только титановые сплавы.

#### Председатель

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту – **к.т.н. Винокурову Льву Николаевичу.** (Отзыв прилагается).

к.т.н., Винокуров Л.Н.

Добрый день, уважаемые члены диссертационного совета. Мне, как разработчику авиационных приборов на основе тензопреобразователей и преобразователей других типов, данная работа представляла особый интерес, поэтому я с удовольствием с ней ознакомился и составил свой отзыв.

Актуальность темы диссертации. Развитие приборостроения неразрывно связано с постоянным совершенствованием датчиковой аппаратуры. В области общепромышленных датчиков давления наибольшее распространение получили датчики на основе тензометрических преобразователей давления. Совершенствование их метрологических характеристик, осуществляется за счет повышения чувствительности, снижения нелинейности, гистерезиса и снижения влияния дестабилизирующих факторов, основным из которых является температура. Поэтому тема диссертационной работы Козлова Александра Ипатьевича, направленная на повышение метрологических характеристик тензопреобразователей давления для датчиковой аппаратуры, является весьма актуальной.

Научная ценность работы заключается в том, что автором с помощью численных методов и экспериментальных исследований были уточнены существующие аналитические описания распределения деформаций тензопреобразователя давления мембранного типа, что позволило обеспечить возможность разработки тензопреобразователей с более высокими метрологическими характеристиками.

Полученные автором экспериментальные профили относительных изменений сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивлений во всем рабочем диапазоне температур позволили разработать уточненную численную модель тензопреобразователя и проверить ее адекватность.

Разработчику наличие такой численной модели позволяет уменьшить сроки разработки, так как не требуется снова проводить полномасштабные экспериментальные исследования, а уже на основе имеющегося математического аппарата можно спроектировать новый чувствительный элемент, после чего уже ставить его на испытания. Считаю это очень важным.

Все предложенные автором математические модели, теоретические и технологические решения были экспериментально исследованы. Таким образом, использованные автором методы теоретического анализа, и экспериментальных исследований оказались достаточными для разработки новых тензопреобразователей для датчиковой аппаратуры.

Особо, конечно же, хотелось бы отметить практическую направленность этой работы, и как следствие – внедрение ее результатов в разработку серийных датчиков. На основе разработанных автором математических моделей и способов повышения чувствительности и снижения аддитивной составляющей температурной погрешности были разработаны новые чувствительные элементы с улучшенными метрологическими характеристиками. Разработанные на основе доработанных чувствительных элементов датчики показали в 1,2–1,6 раза меньшую нелинейность, в 3–7 раз меньшую вариацию выходного сигнала. Компенсация данных погрешностей на уровне именно чувствительного элемента, а не впоследствии, схемной компенсацией или программными методами, позволяет значительно повысить точность датчиков как в стационарных, так и в нестационарных условиях, так как известно, что те же схемные и программные методы компенсации при нестационарных условиях дают довольно большую погрешность.

Кроме того, у вновь разработанного датчика МД-010 на основе чувствительного элемента с измененной топологией расположения тензорезисторов удалось снизить температурный дрейф нулевого сигнала в 2,5–3 раза, что минимизирует дополнительную

температурную погрешность. Как известно, температурный дрейф нулевого сигнала – это одна из основных проблем, связанных с датчиком, и ее компенсация значительно уменьшает погрешность датчика.

Реализованные автором решения при разработке нового чувствительного элемента, также позволили вдвое уменьшить нижний предел измеряемых давлений датчика, на его основе и оптимизировать конструктив чувствительного элемента с двухмембранного на одномембранный. Как следствие – повышение технологичности и снижение себестоимости. Полученные научные и практические результаты внедрены в серийное производство датчиковой аппаратуры ЗАО «МИДАУС», что также подтверждает ценность работы.

По диссертации иеются некоторые замечания:

1. Обзор литературных источников представлен не в 1-й главе, а во введении. Вследствие чего, введение по объему соизмеримо с главами диссертации.

2. В диссертации не приведен патентно-информационный обзор по отечественным и иностранным патентным материалам, хотя во введении есть упоминание, что проведено изучение патентной литературы (с.13), как следствие, сложно сопоставить технический уровень исследования с зарубежными аналогами.

3. В методике эксперимента с.54 приведены погрешности применяемого оборудования и суммарная погрешность косвенного измерения 0,10%, без приведения расчета. При этом погрешность применяемой термопары, равная  $\pm 1^\circ\text{C}$ , вносит в итоговый результат измерения сопротивления тензорезисторов, с учетом их ТКС (с.73), погрешность до  $\pm 0,15\%$ .

4. С.85. Утверждение, что «математическая модель тензопреобразователя с достаточной степенью достоверности и адекватности описывает реальные процессы...» должно быть подкреплено расчётом оценки достоверности и конкретными величинами.

5. В диссертации рассмотрена только аддитивная составляющая температурной погрешности тензопреобразователей и способы ее минимизации. Данные по мультипликативной составляющей не представлены.

6. С. 89. Для снижения температурного дрейфа предложено «сместить тензорезисторы к центру мембраны на 0,9 мм, что позволяет уменьшить температурный дрейф нулевого сигнала в 1,5-2 раза...», однако это приведет к уменьшению чувствительности тензопреобразователя. Поэтому корректнее сравнивать величины дрейфа, отнесенные к чувствительности тензопреобразователя до и после смещения, а не их абсолютные значения.

7. На рис 4.5 с. 90 представлены статистические данные по величине температурных дрейфов нулевых сигналов тензопреобразователей МИДА, но не указан объем выборки, по которой они рассчитаны. Но в данном случае в ходе доклада данное замечание было учтено и устранено.

8. Учитывая практическую направленность работы, патентоспособные результаты, имеющие новизну, целесообразно запатентовать.

Указанные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы и не влияют на главные теоретические и практические результаты диссертации. Замечания носят рекомендательный характер

и могут быть учтены автором при подготовке доклада, представляемого к защите. Говоря о работе в целом, в качестве ее достоинства следует отметить эффективное использование в ней современных теоретических и компьютерных методов исследования и моделирования, сравнение полученных теоретических результатов с экспериментальными данными. В изложении материалов и выводов прослеживается логическая связь. Автор работы показал умение ставить и решать задачи, анализировать полученные результаты и грамотно формулировать выводы.

Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, является законченной научно-исследовательской работой и может быть квалифицирована, как совокупность научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых, вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области приборостроения.

Диссертация написана квалифицированно, литературно-техническим языком, снабжена достаточным количеством правильно оформленного иллюстративного материала. Следует отметить, как положительную сторону, использование автором при оформлении диссертации современных текстовых и графических редакторов, то есть современных издательских средств. Степень апробации работы путем опубликования основных положений в печати (10 публикаций, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК), на конференциях и путем использования полученных методик и моделей в ЗАО «Мидаус», на мой взгляд, вполне достаточна.

Автореферат и опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Тема и содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления".

Диссертационная работа Козлова Александра Ипатьевича на тему «Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 "Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления", является законченной научно-квалификационной работой, которая по актуальности, научно-техническому уровню и практическому значению выполненных исследований, технических и технологических разработок полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук: п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, а сам автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по заявленной специальности

#### Председатель

Слово для ответа на замечания оппонента предоставляется соискателю.

#### Соискатель

На счет замечания, касающегося рассмотрения только аддитивной составляющей температурной погрешности ТП и способе ее минимизации. Для рассмотренных приборов мультипликативную

составляющую температурной погрешности невозможно уменьшить конструктивной оптимизацией, поэтому и отсутствуют по ним данные.

По поводу замечания об уменьшении чувствительности ТП при смещении ТР к центру мембраны и корректности сравнения при этом величин температурных дрейфов нулевых сигналов, отнесенных к чувствительности тензопреобразователя, а не их абсолютные значения. Смещение ТР к центру мембраны приведет к уменьшению чувствительности только в том случае, если при этом размеры УЭ останутся неизменными. В работе же предлагается смещение положения ТР к центру мембраны с одновременным изменением отношения толщины к радиусу мембраны таким образом, чтобы экстремум тензочувствительности оказался на месте расположения ТР, и чтобы чувствительность ТП сохранилась на прежнем уровне.

Председатель

Кто хочет выступить?

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Во многом мое мнение сформулировано в отзыве, которое я утверждал. Там есть и часть замечаний, и положительных моментов. Я бы хотел начать с того, что небрежность в формулировках приводит к тому, что возникает много вопросов. Например, само название диссертации «Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления» это название для докторской работы или для другого перспективного направления, поэтому нужно все-таки четко определить цели и задачи вашего диссертационного исследования. Теперь что касается формулировок положений новизны. Я согласен с тем, что они настолько обще сформулированы, что очень трудно понять зерно вопроса. Но при этом если задать вопрос: «новые знания получены?», последует однозначный ответ: «получены». У нас даже на заседании секции ученого совета обычно бывает какая-то дискуссия, кто-то что-то возражает, а в данном случае мы единодушно приняли и утвердили этот положительный отзыв, поскольку ни у кого не вызвало сомнение то, что новые знания получены. Получены они не путем компьютерного моделирования какого-то численного эксперимента, а экспериментальным путем, никто это не запрещает. Как получать новые знания и как их потом верифицировать, подтверждать и прочее, разные способы существуют. Другой вопрос, что эти новые знания, которые мы увидели, нужно было четко представить, например, так: 1. «..установлено, что деформации распространяются на основание чашки упругого элемента, но не смотря на очевидность, количественно эти деформации никто не оценивал»; 2. «..формула Черницына на самом деле не работает, а все проектировщики его используют для оценки величины смещения положения экстремума»; 3. Для меня тоже оказалось новым то, что «разность температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов, оказывается, не зависит от отношения толщины к радиусу мембраны».

Здесь можно называть много новых фактов и эффектов, которые ранее не были известны и которые сейчас необходимо учитывать при проектировании и моделировании будущим поколениям разработчиков. Поэтому я считаю, что работа вполне соответствует требованиям. Там

были, конечно, некоторые моменты в части привязки темы диссертации к элементам системам управления, но тут нужно сказать, что датчики и преобразователи давления в каких только системах управления не стоят, и именно такого типа являются наиболее значимыми и все что связано с их совершенствованием, конечно же, актуально. Я призываю всех поддержать эту работу.

д.т.н., профессор Ташлинский А.Г.

Я считаю, что любая работа, результаты которого дошли до внедрения в серийное производство, достойно уважения и поддержки, в том числе и нашего совета. Тем не менее, некоторые вещи хотелось бы отметить. Может быть из-за небрежности в терминологии, что также было отмечено, нельзя говорить об адекватности результатов, можно говорить только об адекватности модели. И модель численная, она там как бы и есть, но при этом не показана. И в результате, как они соотносятся, не понятно. И все-таки, исходя из специальности, нужно было вначале указать те системы управления (мы конечно, понимаем и можем домыслить), в которых используются данные тензопреобразователи и датчики. Ведь специальность такова, что это не просто элементы и устройства, в вашем случае тензопреобразователи должны рассматриваться как элементы каких-то систем управления. Потом все-таки я так и не понял, тут дело, наверно, опять же в нечеткой формулировке, по поводу унифицированности, т.е. это унифицированность конструкции за счет расширения диапазона параметров. Говорится, что обеспечивается максимальная чувствительность. Что, на этом нужно закрыть направление, больше не понадобятся датчики с большей чувствительностью. Наверно, это не так, значит это не максимально возможные чувствительности. Далее есть упоминание про совокупность оптимальных параметров. Нет здесь никакой задачи на критериальную оптимизацию параметров: и ставится и решается и обсуждается она как критериальная. Поэтому для того чтобы говорить здесь о каком-то векторе оптимальных параметров нужно говорить по какому критерию проводится оптимизация, а его нет этого критерия. Вот такая вот небрежность формулировок она немножко смазывает впечатление о работе. И опять-таки по поводу формулы Черницына. Если у вас получается, что смещение зависит от двух параметров, то формулу взаимодействия, наверно, нужно было бы привести, а не только линейный член. Не важно кто эту формулу вывел, если изначально было понятно, что они зависимые параметры, то зачем приводить формулу, в которой они независимы? Можно было бы привести модель взаимодействия, хотя бы первого порядка. Ну а в целом, возвращаясь к началу, я считаю, что такие работы заслуживают поддержки и хорошо, что они такие есть – доведенные в наших условиях до такого практического применения.

д.т.н., доцент Киселев С.К.

У меня небольшой комментарий. По ходу выступления ставили вопрос о соответствии работы теме научной специальности. Я специально внимательно посмотрел на это. В положении данной научной специальности, когда говорится об элементах систем управления, в первую очередь перечисляются не датчики, а именно

первичные измерительные преобразователи, которыми в том числе являются тензорезистивные преобразователи давления.

д.т.н., доцент Негода В.Н.

Мне довелось проводить заседание НТС, где была представлена данная работа. У меня сразу возникло ощущение, что мы имеем дело со зрелым специалистом по датчикам и измерениям – это первый момент. Второй момент – сегодня весь рынок датчиков совершенно независим от других рынков, например, тех же усилителей, ПИД-регуляторов и т.д. И надо сказать, что года три тому назад при выборе прибора на рынке датчиков мне пришлось помучаться: во-первых, экземплярзависимость невероятная; во-вторых, стоит только захотеть купить датчик с более качественной и имеющей стабильные характеристики прибор, как сразу же цена на него резко подскакивает вверх. Сегодня рынок настолько зрел, что любая такая работа выращивает претензии на то, чтобы становиться независимыми от других рынков. Каждый раз, когда мне приходилось иметь дело с цифровыми датчиками, обнаруживал: вот датчик вроде бы недорогой, и параметры не совсем плохие, а при расчистке маркировки выяснялось, что сделан он в Китае; либо вот он отечественный, например Челябинский, но оказывается слишком дорогим из-за того, что первичный преобразователь в нем используется европейский. Вот такая ситуация сегодня на рынке датчиков. В моем конкретном случае, при единичном использовании, это еще не было так критично, а вот представьте ситуацию, когда в дорогой большой системе управления, где используются такие преобразователи, пришлось бы заниматься еще дополнительной коррекцией погрешности преобразователя. Этот процесс был бы очень трудоемким и затратным, поэтому, те достигнутые величины процентов погрешностей, которые были здесь показаны, меня вполне удовлетворяют. Я больше верю как раз именно экспериментальной составляющей, потому что практика показывает, что расчетные формулы зачастую порождают значения, которые на практике не сходятся с реальными данными. Я буду поддерживать эту работу.

д.т.н., профессор Дьяков И.Ф.

Мне хотелось бы отметить то, что любая диссертация включает: теоретическую часть, экспериментальную часть и т.д. Если смотреть автореферат, то получается, что теоретическая часть от экспериментальной части не выделена четко, чтобы теория была изложена в одной главе, экспериментальная методика: как, где, чем, какие объекты исследований – в другой. Например, вторая глава – результаты исследований, еще не было теоретической части, а уже приводятся экспериментальные исследования. Ну и в других местах есть там замечания: в третьей главе теория идет параллельно эксперименту, четвертая глава – опять характеристики, то есть диссертация в части оформления продумана не очень хорошо. Тем не менее, все элементы оформления согласно требованиям ВАК присутствуют, поэтому здесь можно сказать, что соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата технических наук.

д.т.н., профессор Стучебников В.М.

Несколько моментов, которые я хотел бы осветить, в том числе принципиальные. Мы, наверное, все согласны с тем, что наука – это познание нового. Наверное, никто не будет возражать против этого. Причем познание идет по двум линиям: иногда независимым, иногда пересекающимся, по-разному – это экспериментальные исследования и теоретические исследования. Причем, давно известно, что основой для продвижения науки вперед являются именно экспериментальные исследования, ибо любая теория, это еще Эйнштейн об этом говорил, рано или поздно начинает противоречить полученным экспериментальным данным и она умирает. Рождается новая теория. Поэтому я бы сказал так, что на мой взгляд, совершенно незаслуженно принижать новые экспериментальные данные, которые не обвязаны какой-то теорией или какими-то математическими расчетами, в том числе и потому, что далеко не всегда это возможно. Как правило, сначала проводится эксперимент, а потом уже придумывается теория для его описания. Это все исходя из общих соображений. Теперь что касается этой работы. Работа, в общем-то, была поставлена довольно давно и смысл ее конечный был такой: да, понятно, даже действительно более-менее очевидно, что аналитическая модель, которой там уже двести лет, и которая сводится к простейшему варианту плоской мембраны жестко защемленной по контуру, в случае реальных тензопреобразователей давления с мембранными упругими элементами чашечного типа она не работает. Ну, очевидно, что не может обращаться в нуль деформация там, где мембрана переходит в край упругого элемента. Это и отмечено в отзыве ведущей организации. Самое удивительное заключается в том, что по сегодняшний день почти все расчеты тензопреобразователей давления ведутся на основе этой модели. Задача была поставлена следующая: создать математическую модель тензопреобразователя давления, которая бы позволила не методом инженерного подбора получать какие-то результаты, а модель, которая адекватно бы описывала свойства тензопреобразователей и на основе которой можно было бы рассчитывать новые тензопреобразователи с новыми требованиями, с новыми конструктивами и т.д. Опыт показал, что модель то разработать можно, но только работает она или нет, без экспериментальных данных сказать трудно. И вот как раз эта часть задачи по разработке модели была возложена на Александра Ипатьевича. Надо сказать, что разработка математической модели (математическая модель была разработана, и мы ее сейчас имеем) не могла быть разработана с нужной степенью адекватности без постоянной корректировки учитывая те результаты, которые были получены в этой диссертации. Поэтому с этой точки зрения здесь нельзя сказать, что это чисто сплошной ползучий эмпиризм. Эта работа как раз дала добро на использование этой математической модели. И там все оказалось не так просто: (в диссертации то это есть, но в докладе на этом не акцентировалось внимание) оказалось, что при расчетах нельзя рассматривать только мембранный упругий элемент чашечного типа. Казалось бы, куда проще: давайте рассмотрим мембранный упругий элемент методом конечных элементов, закрепим не мембрану по контуру, а сам упругий элемент и рассчитаем. Можно рассчитать, но результаты не совпадают с тем, что реально получаются. В итоге

выяснилось, что при расчетах нужно учитывать не только сам упругий элемент, а всю конструкцию тензопреобразователя в целом. Да, это возможно и дает положительный результат, но без экспериментальной проверки это просто не было бы учтено. Мы с вами достаточно часто рассматриваем диссертации, где приведены математические модели. И всегда возникает вопрос: а насколько они адекватны реальности. Иногда такой вопрос решается, иногда этот вопрос повисает и становится задачей для будущих исследований. Поэтому, на мой взгляд, действительно те экспериментальные данные, которые здесь приведены и те следствия, которые следуют из этих экспериментальных данных – это действительно нормальная научная новизна. У нас иногда считается, что научная новизна – это когда что-то рассчитано. Ничего подобного. Хотя здесь, на самом деле, было рассчитано, просто от него этого не требовалось. Вот такой тандем, расчет и эксперимент, дал очень хорошие результаты. И сегодня мы на нашем предприятии можем рассчитывать, причем с хорошей точностью, и прогнозировать характеристики новых преобразователей (новые по конструктиву и т.д.). И вот это как раз то, чего мы добивались. Я считаю, что это очень большой шаг вперед и та работа, которая была представлена, вполне заслуживает того, на что она претендует. Надо здесь подчеркнуть, что здесь была проведена очень большая экспериментальная работа, а еще учитывая, что это было сделано в условиях работающего предприятия и тех проблем, которые ему приходилось решать параллельно, я считаю, что он молодец, что эту работу довел до конца. И что самое главное – эта работа вполне заслуживает поддержания, а Александр Ипатьевич – присвоения ему ученой степени кандидата наук.

Вопрос (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

Владимир Михайлович, где эта математическая модель, о которой вы говорите? Покажите мне плакат, где описана эта математическая модель.

Ответ (д.т.н., профессор Стучебников В.М.):

Эта математическая модель здесь на плакате специально не приведена, она приведена в диссертации.

Вопрос (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

Тогда почему ее здесь (на плакатах) нет?

Ответ (д.т.н., профессор Ярушкина Н.Г.):

Ну потому что он (соискатель), не защищает математическую модель.

Вопрос (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

Тогда о чем здесь речь идет?

Ответ (д.т.н., профессор Стучебников В.М.):

Здесь приводятся (плакаты 5 и 6) результаты расчета с использованием метода конечных элементов на основании этой математической модели.

Вопрос (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

С результатами понятно, а где сама эта математическая модель, какая эта модель? Понимаете в чем дело, вы говорите: "...приведенные экспериментальные результаты подтверждают адекватность теоретической модели...". Меня интересует, на основании чего построены эти графики теоретические? Хотя бы дайте ссылки, скажите где прочитать.

Ответ (д.т.н., профессор Стучебников В.М.):

Хорошо, давайте дадим слово автору этой модели, он, наверно, лучше ответит вам на ваш вопрос.

Председатель

Коллеги, давайте послушаем ответ нашего гостя и перейдем к дальнейшим процедурам, попрошу не забывать про регламент.

Ответ (гость, к.ф.-м.н., с.н.с. Пирогов А.В.):

При изучении характеристик тензопреобразователей, которые использовались, путем предварительного численного моделирования было установлено, что, во-первых, с достаточной точностью работает осевая симметрия, что значительно сокращает время расчетов...

Вопрос (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

Простите, пожалуйста, я прерву вас. У нас здесь не об этом идет речь. Я понимаю какие идеи здесь, и осевая симметрия, и на счет того как расположить тензорезисторы, ближе или дальше от центра, это все и из эксперимента видно. Владимир Михайлович и соискатель говорили о какой-то математической модели, которую я искал и нигде не нашел. Вы можете сказать, какого класса эта математическая модель: это система уравнений, уравнение в частных производных или еще какая-то другая математическая модель?

Ответ (гость, к.ф.-м.н., с.н.с. Пирогов А.В.):

Математическая модель здесь трехмерная, представлена уравнениями в частных производных, решаемая методом конечных элементов. Основана она на общеизвестном уравнении упругости.

Вопрос (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

Если это общеизвестное уравнение, тогда зачем требовалось его подтверждать?

Ответ (гость, к.ф.-м.н., с.н.с. Пирогов А.В.):

Уравнение и не требовалось подтверждать. Тут дело вот в чем. Вы, наверно, и сами прекрасно понимаете, что в зависимости от корректности задания граничных условий, можно получить совершенно разные результаты.

Ответ (д.т.н., профессор Васильев К.К.):

Спасибо, я удовлетворен ответом.

Председатель

Кто еще хочет выступить?

д.т.н., профессор Васильев К.К.

Я не хотел, честно говоря, выступать, но все же выступлю. На мой вопрос, Александр Ипатьевич, по поводу 11 плаката, в своем ответном слове, возможно, вы скажете, что это не так. Александр Ипатьевич сказал, что здесь есть теоретические результаты. Я не нашел ничего кроме экспериментальных результатов, специально все пересмотрел. Может быть, вы скажете, на основании каких теоретических уравнений или еще чего-нибудь там построены данные графики? Я этого не нашел ни в диссертации, ни в автореферате. Я считаю, что и не надо было этого всего. Мне показалось, что упоминание про эти модели, эти уравнения 5 и 6 в автореферате, это все лишнее. Возможно там нужно было рассмотреть взаимодействие, нужно было указать взаимодействие параметров этих моделей. В любом случае, это все как-то лишнее. Правильно сказал Вячеслав Андреевич: есть новые знания, есть рекомендации к проектированию этих преобразователей, ну и хорошо. Доказан выигрыш, который получен, т.е. улучшение характеристик преобразователей. Зачем говорить про какие-то математические модели, которые в диссертации не представлены, и не надо здесь этого. И если оставить теперь тут нормальные результаты, которые получил исследователь, чисто экспериментально, без привлечения всяких математических моделей (по крайней мере, я этого не увидел), так вот – этого достаточно. Он проявил себя как исследователь, посмотрел, проанализировал, нашел там новые свойства, характеристики – ну и хорошо. Я буду голосовать за.

Председатель

Коллеги, если есть мнения, которые связаны с оценкой прозвучавших положений, то, пожалуйста, можете прокомментировать, но это не должна быть какая-то факультативно возникшая дискуссия о предмете. Пожалуйста, можно высказываться конкретней, по существу?

д.т.н., доцент Сергеев В.А.

Тут есть предложения завершить обсуждения, но я все же попрошу обратить внимание вот на что. В автореферате есть две статьи, в ВАКовских журналах "датчики и системы", хорошие журналы, между

прочим, я его читаю и могу подтвердить, что называются они: "моделирование тензопреобразователей...". Значит, какой-то модельный подход все-таки существует, численный расчет и так далее, поэтому давайте, действительно эту дискуссию закроем. Он не защищает модель как таковую, другое дело оценка ее адекватности на основе этих экспериментальных данных, и давайте согласимся с тем, что он не претендует на эту модель, и результаты эксперимента дают вполне конструктивную основу для дальнейшего движения, даже для самого моделирования.

Председатель

Коллеги, вот видите, у вас снова возникает дискуссия не по существу. Мы в настоящий момент времени с вами закончили обсуждение конкретных положений диссертаций, или по ним еще есть какие-то вопросы? Есть предложения закончить дискуссию, с оценкой работы, мне кажется, ясность наступила.

**Соискателю предоставляется заключительное слово.**

Соискатель

Пользуясь предоставленным словом, я хочу, прежде всего, поблагодарить своих научных руководителей - это Владимира Михайловича Стучебникова и Сергея Константиновича Киселева. Без них работа в том виде, в котором она была здесь представлена, она бы не появилась. Также хотел бы поблагодарить ведущую организацию в лице Сергеева Вячеслава Андреевича за те критические замечания, которые были учтены при подготовке к защите диссертации. Также хочу поблагодарить оппонентов, за то что они согласились выступить оппонентами и приехали со столь большого расстояния, за замечания по работе. Также выражаю свою благодарность членам Совета за внимание и желание выслушать.

Председатель

Переходим к голосованию. Какие будут предложения по составу счетной комиссии? Поступили предложения включить в состав счетной комиссии доцента Афанасьева А.А., профессора Васильева К.К. и доцента Неоду В.А.

Прошу голосовать. Возражений нет.

Председатель

Прошу счетную комиссию приступить к работе.

(Счетная комиссия организует тайное голосование.)

Председатель

Коллеги! Продолжаем нашу работу. Слово предоставляется председателю счетной комиссии **Васильеву К.К.**

Оглашается протокол счетной комиссии.  
(Протокол счетной комиссии прилагается).

Кто против? (Нет).

Кто воздержался? (Нет).

Протокол счетной комиссии утверждается.

Таким образом, на основании результатов тайного голосования (за - 14 , против - нет , недействительных бюллетеней - нет) диссертационный совет Д212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете признает, что диссертация **Козлова А. И.** содержит новые решения по исследованию и разработке мембранных тензопреобразователей давления, соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (**п.9** "Положения" ВАК), и присуждает **Козлову Александру Ипатьевичу** ученую степень кандидата технических наук по специальностям **05.13.05**.

Председатель

У членов Совета имеется проект заключения по диссертации **Козлова А. И.** Есть предложение принять его за основу. Нет возражений? (Нет). Принимается.

Какие будут замечания, дополнения к проекту заключения?

**(Обсуждение проекта) .**

Председатель

Есть предложение принять заключение в целом с учетом редакционных замечаний. Нет возражений? Принимается единогласно.

**(Заключение объявляется соискателю) .**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д212.277.01 НА БАЗЕ  
ФГБОУ ВПО «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»\_ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 28.01.2015. №2

О присуждении Козлову Александру Ипатьевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Исследование и разработка мембранных тензопреобразователей давления» по специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» принята к защите 26 ноября 2014 г. протокол № 9 диссертационным советом Д 212.277.01 на базе ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, приказ №847-в от 08 декабря 2000 года.

Соискатель Козлов Александр Ипатьевич, 1980 года рождения, в 2002 году окончил ГОУ ВПО «Ульяновский государственный университет»; с 2012 по 2015 год обучался в заочной аспирантуре ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»; работает научным сотрудником в ЗАО «Микроэлектронные датчики и устройства».

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», на кафедре «Измерительно-вычислительные комплексы».

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент Киселев Сергей Константинович, ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет», начальник Управления информатизации.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Стучебников Владимир Михайлович, ЗАО «Микроэлектронные датчики и устройства», г. Ульяновск, генеральный директор.

Официальные оппоненты:

1. Мокров Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», профессор кафедры «Приборостроение».
2. Винокуров Лев Николаевич, кандидат технических наук, ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения», начальник тематической комплексной бригады ТКБ-222.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Ульяновский филиал ФГБУ науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, в своем положительном заключении, подписанном заместителем директора по научной работе, к.т.н. Черторийским Алексеем Аркадьевичем, ученым секретарем и старшим научным сотрудником, к.ф.-м.н. Ходаковым Александром Михайловичем и утвержденным директором, д.т.н. Сергеевым Вячеславом Андреевичем, указала, что диссертация является законченным научным исследованием, которая по актуальности, научным и практическим результатам и их значимости соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 10 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 4. Общий объем работ 5,95 п.л.. 6 работ опубликовано в материалах Всероссийских и международных конференций. Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2008. – №1. – С. 6-11.
2. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2009. – №8. – С. 50-53.
3. Козлов, А.И. Экспериментальное определение распределения деформаций в круглой упругой мембране тензопреобразователя давления / А.И. Козлов, В.М. Стучебников // Приборы. – 2014. – №7. – С. 41-44.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

**1. Новосибирский государственный технический университет.** Отзыв подписан профессором кафедры «Полупроводниковых приборов и микроэлектроники», д.т.н., заслуженным работником высшей школы **Гридчиным В.А.** Замечания: автор излишне расширительно обобщает результаты своих измерений. Наличие максимума деформации и его зависимость от геометрии упругого элемента для обычных кремниевых интегральных тензопреобразователей с мембраной, сформированной анизотропным травлением – давно известный факт. Но для

рассматриваемого КНС тензопреобразователя, из-за особенностей его конструкции, представленные результаты являются новыми и интересными; аналитическая модель, выбранная для сравнения, не слишком удачна, учитывая размеры упругого элемента. Аналитическая модель – это модель тонких диафрагм. Опять таки известно, что распределение деформации в толстых пластинах отличается от тонких, также как и топология тензопреобразователей; при анализе деформации упругого элемента ни в автореферате, ни в диссертации не обсуждается вопрос об учете предварительной деформации, от соединения КНС пластины с чашечным упругим элементом. А этот вопрос методики измерений и влияет на погрешность определения деформации.

**2. Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации (УВАУГА).** Отзыв подписан профессором кафедры «Управление качеством авиатранспортных систем», д.т.н., профессором **Дмитриенко Г.В.** Замечания: на стр. 9 рис. 1 не подписаны графики, не понятно где  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon_t$ ; в автореферате не указаны причины установленного значительного расхождения результатов аналитических расчетов и экспериментальных данных распространения упругих деформаций мембраны за линию ее жесткого защемления.

**3. ЗАО «Промсервис».** Отзыв подписан к.т.н., **Колесниковым А.Н.** Замечание: следует обратить внимание автора на целесообразность использовать систему СИ и измерять температуру в Кельвинах.

**4. Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова (ВНИИА).** Отзыв подписан старшим научным сотрудником, к.т.н., **Очеретянским А.Л.** Замечание: автореферат был бы более информативен, если бы хотя бы на отдельные работы (наиболее значимые), перечисленные на стр. 4 и 11 были бы даны ссылки.

**5. Научно-исследовательский институт физических измерений (ОАО НИИФИ).** Отзыв подписан ученым секретарем и членом научно-технического совета ОАО «НИИФИ», д.т.н., **Папко А.А.** и д.т.н., **Белозубовым Е.М.**, соответственно. Замечания: отсутствует обоснование возможности распространения экспериментальных результатов, полученных на полупроводниковых чувствительных элементах, на любые тензопреобразователи с упругими элементами чашечного типа; в списке публикаций автора отсутствуют единоличные публикации автора; в списке публикаций автора отсутствуют сведения о защите разработанных соискателем технических решений объектами интеллектуальной собственности: патентами на изобретения, полезными моделями и т.д.

**6. Чистопольский филиал «Восток» казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева.** Отзыв подписан профессором кафедры «Приборостроение», к.т.н., доцентом **Прохоровым С.Г.** Замечание: из текста не совсем ясно, насколько учтены экспериментальные данные смещения максимума величины  $\delta$  (рис. 4) при оптимизации топологии чувствительного элемента. Особенно интересны результаты оптимизации при больших толщинах мембраны, когда максимум смещается за ее границу.

**7. ОАО «Манотомь».** Отзыв подписан заместителем генерального директора, к.т.н., доцентом **Свинолуповым Ю.Г.** Замечание: в автореферате было бы полезнее сравнивать характеристики серийных и разработанных ТП не в табличном, а в более наглядном виде.

**8. Ульяновское конструкторское бюро приборостроения (ОАО «УКБП»).** Отзыв подписан начальником расчетно-теоретического отдела, к.т.н.,

**Сорокиным М.Ю.** Замечания: отсутствуют описания состояния рассматриваемого вопроса за рубежом и сравнительные характеристики с зарубежными аналогами; в автореферате не показано, какой именно метрологической характеристике отдавалось предпочтение при оптимизации тензопреобразователей, а также не обозначено, какие именно технические решения, кроме размещения тензорезистров, были внедрены для улучшения метрологических характеристик.

**9. Научно-производственное объединение «Марс» (ОАО «НПО «Марс»).**

Отзыв подписан главным научным сотрудником, д.т.н., доцентом **Токмаковым Г.П.** Замечания: в автореферате не приведены обоснования снижения стоимости ПЧЭ в зависимости от уменьшения ее площади (см. стр. 19); в тексте автореферата встречаются нераскрытые аббревиатуры (например ТПЭ, МИДА).

**10. Самарский государственный аэрокосмический университет им. Академика С.П. Королева.** Отзыв подписан заведующим кафедрой электротехники, д.т.н., профессором **Гречишниковым В.М.** Замечание: недостаточно полное описание результатов для тензомодулей, рассчитанных на низкие давления. В частности, не раскрыты причины сдвига экстремума чувствительности к центру тензомодуля, отмечено только его наличие.

**11. Ульяновский государственный университет.** Отзыв подписан ведущим научным сотрудником, д.ф.-м.н., профессором **Светухиным В.В.** Замечания: в п. 4. научной новизны указан эффект снижения себестоимости изготовления ТП, однако в тексте автореферата не приведен сравнительный технико-экономический анализ производства аналогичных известных и предлагаемых датчиков; пункты 2, 3 и 4 положений, выносимых на защиту, являются очевидными, носят декларативный характер и не несут в своей постановке ни количественных ни качественных утверждений, подтверждающих положение; в главе 4 приводятся результаты, отмечающиеся как новые технические решения, однако новизна указанных результатов не подтверждается патентами на изобретения и полезные модели.

**12. ООО «Авиакомпания Волга-Днепр».** Отзыв подписан директором по качеству, к.т.н., **Дятловым А.Ю.** Замечания: из автореферата не понятно, является ли автор диссертации разработчиком численной модели с использованием метода конечных элементов, результаты расчета по которой используются в первой главе диссертации; в п. 2 работы сделан общий вывод о справедливости полученного распределения деформаций на поверхности мембранного упругого элемента деформациям любого другого упругого элемента чашечного типа. Для корректности вывода требуется указать основные критичные и граничные параметры УЭ, при которых данный вывод действительно справедлив.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью в области исследования по теме диссертации, подтверждаемой публикациями в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:  
разработаны мембранные тензопреобразователи давления с улучшенными метрологическими характеристиками (нелинейностью, вариацией и температурным дрейфом выходного сигнала);

предложены новые принципы проектирования тензопреобразователей давления с упругими элементами чашечного типа и топологии тензочувствительной схемы;

доказано распространение деформаций при нагружении упругого элемента давлением или силой за пределы контура мембраны чашечного типа на основание упругого элемента и на жесткий центр.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказаны адекватность использованной математической модели тензопреобразователя давления, а также отличие распределения деформаций в упругом элементе от расчетных значений деформации, получаемых на основе аналитической модели жестко заземленной по контуру мембраны.

применительно к проблематике диссертации результативно использован экспериментальный тензометрический метод, и метод конечных элементов для решения задачи анализа упруго-деформированного состояния мембранного упругого элемента;

изложены экспериментальные и теоретические способы определения деформаций в мембранных упругих элементах чашечного типа;

раскрыто несоответствие результатов расчета зависимости величины деформаций от расстояния до центра мембраны при использовании широко применяемой на практике аналитической модели упругого элемента чашечного типа тензопреобразователей давления и его численной модели;

изучено влияние высокотемпературной пайки чувствительных элементов на основе структур «кремний на сапфире» на величину температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов, а также влияние краевого эффекта на разность температурных коэффициентов сопротивления тензорезисторов, расположенных в смежных плечах мостовой тензосхемы;

проведена модернизация серийно выпускаемых тензопреобразователей и датчиков давления на основе структур «кремний на сапфире».

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработан и внедрен в серийное производство тензопреобразователей и датчиков давления новый унифицированный полупроводниковый чувствительный элемент на основе структур «кремний на сапфире»;

определены зависимости изменения распределения деформаций в упругом элементе тензопреобразователя давления от геометрических размеров мембраны;

представлены рекомендации для улучшения метрологических характеристик тензопреобразователей давления.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на современном сертифицированном и поверенном оборудовании;

используемая теория подтверждена экспериментальным доказательством адекватности численной модели тензопреобразователя, рассчитываемой методом конечных элементов;

использовано сравнение полученных экспериментальных результатов величины смещения положения экстремума тензочувствительности с данными, опубликованными в открытой печати.

Личный вклад соискателя состоит в: выполнении большей части теоретических и всех экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая разработку методик экспериментальных исследований, макетных образцов

тензопреобразователей и оснастки для испытаний, в выборе необходимого оборудования и проведении исследований, в анализе и оформлении результатов в виде публикаций и научных докладов и сопоставлении полученных экспериментальных результатов с данными расчета по известной математической модели тензопреобразователя.

На заседании 28.01.2015 г. диссертационный совет принял решение присудить Козлову А.И. ученую степень кандидата технических наук. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 14, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Защита окончена. Есть ли замечания по процедуре защиты? (Нет).

Поздравляет соискателя с успешной защитой. Благодарит членов совета и всех участников за внимание.

**Заседание объявляется закрытым.**

Председатель Совета Д212.277.01  
профессор

Ученый секретарь Совета Д212.277.01,  
профессор



Н. Г. Ярушкина

В. И. Смирнов