

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Информационно-измерительная техника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент, начальник отдела
стандартизации СКБ
_____/ В.Р. Гергедава/
«__» _____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой, д.т.н., проф
_____/А.Л. Шестаков/
«__» _____ 2019 г.

Тензорезистивный сенсор давления с функцией самодиагностики

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР

Руководитель, д.т.н., профессор
_____/В.А. Ларионов
«__» _____ 2019 г.

Автор проекта
студент группы КЭ-225
_____/Д.А. Абдуллин
«__» _____ 2019 г.

Нормоконтролер, доцент
_____/А.С. Волосников
«__» _____ 2019 г.

Челябинск 2019

АННОТАЦИЯ

Абдуллин Д.А. Тензорезистивный сенсор давления с функцией самодиагностики – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-225, 2019, 102 с., 61 ил., библиогр. список – 53 наим.

В ходе выполнения научно-исследовательской работы, были рассмотрены программные пакеты для 3D моделирования, такие как: Solid Works, AutoCAD Inventor, Ansys, Компас 3D. Был произведен анализ основных источников погрешности и причин выхода из строя датчиков давления. Рассмотрены проблемы технической и экономической внедрения подобных систем в разрабатываемые и существующие промышленные сенсоры.

Спроектирована 3D-модель преобразователя давления. Проведён модальный анализ.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			Лист	Листов
Разраб.		Абдуллин Д.А.			ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЙ СЕНСОР ДАВЛЕНИЯ С ФУНКЦИЕЙ САМОДИАГНОСТИКИ		5	102
Провер.		Ларионов В.А.						
Рец.								
Н. Контр.		Волосников А.С.						
Утверд.		Лалин А.П.						
					Кафедра ИНИТ ЮУрГУ			

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ.....	10
1.1 Анализ технического задания.....	10
1.2 Актуальность разработки новых интеллектуальных датчиков с возможностью оценки их технического состояния в процессе эксплуатации...	11
1.3 Анализ основных источников погрешности и причин выхода из строя датчиков давления	11
1.4 Способы реализации метрологического самоконтроля и диагностики неисправностей в измерительных устройствах и подходы к моделированию средств измерения	13
1.5 Общие принципы обработки информации для контроля метрологического состояния датчиков	19
1.6 Диагностика технического состояния датчика давления на основе компьютерного моделирования и оценки параметров его частотной характеристики	26
1.7 Обзор аналогов.....	29
1.8 Выбор среды моделирования.....	39
2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ.....	46
2.1 Разработка системы компьютерного моделирования датчика давления	46
2.2 Создание объемной геометрической модели датчика.....	48
2.3 Задание свойств материалов	51
2.4 Задание контактных условий.....	52
2.5 Оценка частот собственных колебаний конструкции преобразователя..	55

2.6 Расчет выходного давления	61
2.7 Построение конечно-элементной модели.....	66
3 НАХОЖДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	72
3.1 Компьютерное моделирование дефектов конструкции преобразователя давления и исследование их влияния на частоты преобразователя	72
3.2 Моделирование налипания на разделительную мембрану инородного тела	77
3.3 Моделирование пластической деформации разделительной мембраны.	79
3.4 Моделирование изменения толщины измерительной мембраны	83
3.5 Моделирование нарушения сварного шва «измерительная мембрана – шток»	85
3.6 Обобщение влияния дефектов на частоты преобразователя	86
3.7 Применимость разработанной системы компьютерного моделирования в других областях	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	100

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается рост интереса со стороны промышленности к так называемым интеллектуальным средствам измерения, обладающим большими возможностями по сравнению с традиционными средствами измерения. В соответствии с ГОСТ Р 8.673-2009, интеллектуальным датчиком является такой датчик, параметры и/или алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов, держащихся в нем преобразователей, а также который обладает функцией метрологического самоконтроля, то есть обеспечивает автоматическую проверку того, находится ли его текущая погрешность измерений в заданных пределах.

В ряде случаев, когда метрологический самоконтроль еще не реализован, необходимым является обеспечение возможности оценки и/или диагностики технического состояния средства измерения, менее информативной, чем метрологический самоконтроль, но важной для принятия решения об использовании данного устройства в технологическом процессе. Контроль технического состояния датчиков в процессе эксплуатации позволит повысить безопасность технических систем, предотвращать аварийные ситуации на ранней стадии, увеличить межповерочный интервал средств измерения, что в свою очередь имеет положительный экономический эффект. Это обуславливает актуальность научной проблемы поиска принципов и способов диагностики состояния датчиков, в частности датчиков давления.

Данное диссертационное исследование посвящено моделированию модели датчика давления, с целью получения зависимости амплитуды колебаний мембраны от частоты.

Представление датчика в виде линейной системы с колебательными звеньями и модель выходного сигнала датчика используется для изучения влияния параметров конструкции датчика на его выходной сигнал, разработки и анализа эффективности численного метода оценки частот в выходном сигнале.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

Элементы научной новизны работы:

Предложенные методы метрологического самоконтроля датчиков температуры и давления позволяют выявить происходящие изменения в характеристике сенсоров от времени в виде изменения функции диагностики.

Практическая значимость работы состоит в получении количественных оценок ожидаемого изменения значений частот вследствие различных дефектов датчика.

Цель работы: исследование преобразователя давления путем компьютерного моделирования с целью получить зависимость чувствительности (амплитуды колебания) мембраны от частоты колебаний измеряемого давления.

Основные задачи исследования.

1. Анализ современных подходов к оценке технического состояния датчиков давления.
2. Разработка модели первичного измерительного преобразователя датчика давления.
3. Нахождение характеристик математической модели.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

По ГОСТ Р 8.673-2009. интеллектуальным датчиком называется «адаптивный датчик с функцией самоконтроля» [23]. Под адаптивным датчиком в данном случае понимается конструктивно обособленное устройство, содержащее один или несколько первичных измерительных преобразователей, «параметры и/или алгоритмы работы которого в процессе эксплуатации могут изменяться в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей». Под метрологическим самоконтролем понимается «автоматическая проверка метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации, осуществляемая с использованием принятого опорного значения, формируемого с помощью встроенного в датчик средства (измерительного датчика или меры) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала» [23]. Другими словами, интеллектуальный датчик обеспечивает автоматическую проверку того, находится ли его текущая погрешность измерений в заданных пределах. Состояние датчика, при котором его погрешность в процессе эксплуатации в рабочих условиях находится в установленных пределах, и называют метрологической исправностью.

1.1 Анализ технического задания

Исходя из технического задания, диапазон задаваемых статических давлений позволяет определить максимальные амплитуды пульсаций выходного давления. Так же заданные характеристики в техническом задании позволяют рассчитать резонансную частоту мембраны.

Исходя из выше изложенного, проектируемый датчик должен состоять из защитного корпуса, разделительной мембраны, корпуса самого датчика, канала для кремнийорганической жидкости, внутренней мембраны, измерительной мембраной, чувствительного элемента – тонкой пластины, что позволит провести испытания датчика, а именно получить зависимость чувствительности (амплитуды колебания) мембраны от частоты колебаний измеряемого давления.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.2 Актуальность разработки новых интеллектуальных датчиков с возможностью оценки их технического состояния в процессе эксплуатации

В соответствии с [24] метрологический самоконтроль направлен на снижение вероятности получения недостоверной измерительной информации в течение межповерочного или межкалибровочного.

Под техническим состоянием объекта, как правило, понимают определенный набор свойств объекта, определяющих его функционирование. Вопросы диагностики систем и механизмов, в их общем понимании, начали развиваться одновременно с появлением контрольно-измерительной аппаратуры, то есть с конца 19-века. В это время процесс контроля сводился, в основном, к проверке нахождения измеряемой величины в допустимых пределах.

В данном представлении самодиагностика является частью самоаттестации, то есть диагностика ограничивается выявлением неисправности и указанием ее типа, а аттестация подразумевает выявление того, как данная неисправность влияет на качество измерения (метрологию) и, если это возможно, осуществление коррекции результата измерения.

Разработка средств измерения с возможностью метрологического контроля с целью увеличения межповерочного интервала велась в России с конца 80-х годов прошлого века [26, 55-57, 66]. В концепциях метрологического самоконтроля и самоаттестации предполагается не просто наличие механизма диагностики неисправностей, но выход на «качество измерений», указание статуса результата измерения (достоверный, экстраполированный, недостоверный и др.). Несмотря на то, что общий подход к обеспечению самодиагностики и самоконтроля хорошо описан, актуальной задачей является создание моделей и разработка диагностических стратегий для конкретных типов измерительных устройств.

1.3 Анализ основных источников погрешности и причин выхода из строя датчиков давления

В соответствии с ГОСТ Р 8.734-2011 [24] выбор метода метрологического самоконтроля при разработке интеллектуального средства измерения должен

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

опираться на результаты анализа составляющих погрешности датчика. Анализ составляющих погрешности включает в себя как выявление источников погрешности, так и определение критической составляющей погрешности. При выявлении источников погрешности, нарастающей в процессе эксплуатации, рекомендуется, в частности, осуществить следующие этапы:

- анализ ожидаемых условий эксплуатации;
- анализ публикаций в научно-технической литературе, касающихся причин возникновения погрешностей аналогов;
- анализ опыта эксплуатации аналогов по сведениям о причинах метрологических отказов в процессе эксплуатации;
- выявление «слабых звеньев» аналогов (под «слабыми звеньями» понимают элементы и узлы конструкции, изменение характеристик которых, в том числе вследствие изменения свойств материалов, может со временем привести к существенному росту погрешности).

В [24] указывается, что возникновение погрешности в процессе эксплуатации, в основном, обусловлено:

- а) изменением характеристик материалов, элементов и узлов конструкции, а также технологических процессов (при их полном соответствии конструкторско-технологической документации);
- б) повреждениями, вызванными нарушениями технологических процессов изготовления датчиков или каналов измерительной системы;
- в) вторичными повреждениями в процессе эксплуатации как следствием процессов, вызванных повреждениями пункта б).

В ГОСТ Р 8.734-2011 [24] также приведены источники погрешности и условия их возникновения, характерные для датчиков и преобразователей давления. К первому рангу приоритета отнесены такие источники погрешности и условия их возникновения, как:

- выбросы давления за пределы диапазона, указанного в документации;
- осадки, засорение технологической мембраны;

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

- отклонение функции преобразования, обусловленное эффектами старения, например, временем, давлением, температурой, перегрузкой;
- слишком большой «бросок давления вниз» в рабочих условиях.

Ко второму рангу приоритета отнесены:

- эрозионный износ, коррозия на технологической диафрагме, вплоть до разрыва диафрагмы;
- технологическое уплотнение в контакте с фронтальной стороной диафрагмы.

Некоторые из перечисленных причин не приводят мгновенно к полному отказу датчика. В таком случае может наблюдаться постепенный уход метрологических характеристик, без явных признаков полной неработоспособности. В связи с этим необходима разработка методик, позволяющих осуществлять контроль метрологической исправности датчика на основе диагностических признаков, позволяющих следить за появлением причины отказа на ранних этапах ее развития.

По итогам проведенного анализа представляется возможным выбрать ряд типичных причин нарастания погрешности и отказов датчиков, которые в то же время предположительно существенно влияют на частотную характеристику датчика. Это: изменение геометрии мембраны (утончение в результате коррозии, пластические и остаточные деформации); нарушение сварных соединений мембраны и корпуса; налипание инородных тел. Для детального исследования влияния данных факторов на частоты собственных колебаний было проведено компьютерное моделирование датчика давления.

1.4 Способы реализации метрологического самоконтроля и диагностики неисправностей в измерительных устройствах и подходы к моделированию средств измерения

Исследования с целью создания датчиков с функцией метрологического самоконтроля (самоаттестации) начались за несколько лет до появления концепции метрологического самоконтроля (самоаттестации). В настоящее время известен целый ряд публикаций, посвященных датчикам разных физических

величин, использующих разные физические явления и диагностические стратегии для обеспечения метрологического самоконтроля. Предложены интеллектуальные датчики давления [9, 43, 62, 67, 81, 88, 98], датчики температуры [8, 32, 61, 82-83, 86, 147], датчик разбавленного кислорода [90], датчики расхода [103-104, 106, 148-149], расстояния [26], удельной электропроводимости [27], способ самоаттестации акселерометра [85] и другие. Обзоры датчиков с функцией метрологического самоконтроля или самоаттестации даны в [67, 97]. Современные публикации, посвященные диагностике отдельных средств измерения, а также разработка и принятие ГОСТ, описывающих основные термины и методы, касающиеся обеспечения самоконтроля, свидетельствуют об актуальности данного научного направления.

Часть современных работ [9, 62, 67, 81, 88, 98] посвящена датчикам давления, в том числе основанным на тензо- и пьезоэффектах. В работе [67] описаны несколько примеров реализации метрологического самоконтроля в датчиках давления. Так, в [43] диагностический параметр вводится на основе пространственной избыточности. В датчике давления мембрана жестко связана с плунжером, перемещение которого внутри индуктивного преобразователя формирует выходной сигнал. В датчик введен электромагнит, катушка которого также охватывает плунжер. Подавая фиксированное значение тока на катушку электромагнита, можно перемещать мембрану, имитируя определенное приращение давления, реализуя тестовый режим. В качестве диагностического параметра используют изменение выходного сигнала в результате фиксированного изменения тока электромагнита.

Пространственная избыточность используется также для диагностики датчика давления с упругим первичным измерительным преобразователем в [9, 81]. В таком преобразователе, например, трубке Бурдона, критическая составляющая погрешности, как правило, обусловлена остаточными деформациями, возникающими в процессе эксплуатации [67]. Точкой съема измерительной информации в трубке Бурдона является ее свободный конец (точка А),

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

перемещение которого измеряется при изменении давления. Место расположения точки съема дополнительной информации (точка В) выбирается таким образом, чтобы остаточные деформации различно влияли на перемещение трубки в зонах точек А и В. В качестве диагностического параметра используется отношение перемещений этих точек.

В [62] предложены общие соображение о том, как необходимо осуществлять контроль метрологической исправности датчика неэлектрической величины. Согласно данному способу в чувствительном элементе измерительного преобразователя выделяют части, имеющие различную чувствительность к фактору, влияющему на метрологическую исправность преобразователя, а в процессе эксплуатации периодически измеряют значения сигналов от этих частей и по ним судят о метрологической исправности преобразователя. Устройство для осуществления способа может являться измерительным преобразователем давления. Оно использует чувствительный элемент, части которого имеют различную чувствительность к влияющему на метрологическую исправность преобразователя фактору. Преобразователи сигналов с этих частей чувствительного элемента подключены к блоку измерения и контроля. Это позволяет проводить контроль метрологической исправности измерительного преобразователя непосредственно в процессе его эксплуатации.

В работе [88] рассматривается интеллектуальный волоконно-оптический датчик давления, в котором организован метрологический самоконтроль на основе информационной избыточности. Выходной сигнал датчика зависит от изменения длины полости резонатора, вызываемый приложенным давлением, а также от изменения центральной длины волны первичного преобразователя, обусловленного настройкой перестраиваемого фильтра. Эти две зависимости формируют информационную избыточность. Критическая составляющая погрешности датчика связана с остаточной деформацией резонатора и появлением остатков на его поверхности, что может быть обнаружено предложенным способом.

В работе исследователей из Харбинского технологического института [98] предлагается новый образец датчика давления с метрологическим самоконтролем. Предложенный образец датчика основан на использовании плоской круглой мембраны с расположенными на ней различными группами тензодатчиков, часть которых используется для измерения давления, а другие – для калибровки. Задача диагностики формулируется в терминах концепции SEVA, предложенной М. Генри, и звучит следующим образом: исследовать теорию и подходы к технологии создания самоаттестующихся датчиков и разработать образец самоаттестующегося датчика давления. В статье предложено решение для всех этапов самоаттестации: разработана особая конструкция преобразователя, предложен метод обнаружения и диагностики неисправностей, методы вычисления параметров самоаттестации и разработан передатчик, основанный на системе процессоров с двойной обработкой сигналов.

Статья преимущественно посвящена вопросу разработки той части датчика, которая отвечает за обработку и передачу сигнала измерительного преобразователя, причем основана на структурной избыточности, предполагая использование 32 тензорезисторов. В качестве неисправностей приводятся: появление в мосту тока или напряжения смещения; нарушение моста; импульсный шум в линии питания или заземления; нестабильность питания моста; старение тензорезисторов; нарушение вывода моста; электромагнитные помехи от источника питания; блокировка измерительной линии; нарушение входа моста. Эти неисправности, как правило, не характеризуют состояние самого чувствительного элемента, и не учитывают дефекты, которые могут произойти с мембраной, например, в результате гидравлического удара или пульсаций давления. Кроме того, при использовании 28 одинаковых тензорезисторов нет гарантии, что уход их параметров не будет одновременным.

Для создания и выпуска самоаттестующихся датчиков важно понимание взаимосвязи между погрешностью измерений и возникающими в системе неисправностями. Для этого необходимы масштабные исследования по систематизации основных видов неисправностей, разработке алгоритмов их

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

поиска и реализации технических методов восстановления работоспособности. Решению этих задач, а именно разработке методов обнаружения и устранения неисправностей конкретных видов датчиков, посвящено большое количество современных зарубежных исследований: [91, 93-96, 111, 135, 142, 144, 146-147, 149] и др. Данные исследования охватывают разнообразные математические подходы для решения формализованной задачи обнаружения и диагностики неисправностей сенсора. Большая часть работ посвящена исследованию датчиков в системах кондиционирования помещений и системах управления автомобилем.

В [111] рассматривается диагностика кремниевого пьезорезистивного датчика давления путем измерения низкочастотного шума. Благодаря тому, что уровень шума в низкочастотной области (от 10 до 100 Гц) зависит от качества оксидной поверхности, возможно контролировать качество образца путем измерения шума после того, как в датчик залито масло и закончен процесс герметизации. В статье проведен теоретический анализ зависимости шума от качества оксида, разработана модель шума и произведены эксперименты, показывающие, что уровень низкочастотного шума может быть использован для оценки качества образца.

В работах группы английских ученых [79-80, 107, 152-153] исследована возможность диагностики технического состояния расходомеров, преобразователей давления различной конструкции и приборов на их основе путем анализа выходного сигнала измерительного преобразователя и идентификации его передаточной характеристики.

В работе [147] описана разработка конечно-элементной модели керамического датчика давления и ее использование в задаче диагностики неисправностей датчика. Метод, описанный в статье, состоит в том, что сначала тестируют объект, подгоняют под него модель, затем модель используют для различных нужд, среди которых может быть и диагностика неисправностей. В основной части статьи рассматривается преобразователь давления, структура которого содержит диафрагму с четырьмя тонкопленочными резисторами, являющимися тензометрическими. Дано описание модели преобразователя, основанной на

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

численных отношениях между напряженностью, удельным сопротивлением и механическими напряжениями, а также проверка модели с помощью экспериментов. Модель используется для диагностики неисправностей следующим образом. Производят измерение относительного изменения сопротивления резисторов в зависимости от приложенного давления и сравнивают с ожидаемой зависимостью. Отклонение в графике изменения данной величины для хотя бы одного из резисторов служит критерием для обнаружения неисправности, причем по виду отклонения можно сделать предварительные выводы о характере неисправности: неровное нанесение резисторов, неточное прикрепление диафрагмы и т.п.

Конечно-элементная модель также является средством для проверки различных гипотез о происхождении ошибки, позволяя осуществлять локализацию неисправностей. Использование конечно-элементной модели позволяет избежать необходимости экспериментального подтверждения диагностических гипотез, часто приводящего к разрушению материала.

К сожалению, данный подход не лишен недостатков. В первую очередь это связано с необходимостью разработки адекватной модели преобразователя, для чего может потребоваться учет большого числа параметров, что в свою очередь невозможно без масштабных экспериментальных исследований. Безусловно, использование модели является важным этапом при разработке диагностической стратегии, но если построение конечно-элементной модели само по себе является частью алгоритма диагностики неисправностей, то это может привести к снижению ее работоспособности и возникновению вычислительных трудностей. Кроме того, в данной статье не рассмотрены такие возможные неисправности, как изменение толщины мембраны в результате коррозии, налипание грязи и др.

Известны и другие работы, посвященные моделированию преобразователей давления или их конструктивных элементов. В [38-39] проведен расчет напряженного состояния поверхности чувствительных элементов на основе структур «кремний-на-сапфире» в двухслойных тензопреобразователях давления и соответствующих изменений сопротивлений тензорезисторов, расположенных

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

на ЧЭ. Расчет напряженного состояния проводился методом конечных элементов для конкретного типа ТП с учетом влияния формы штуцера и сварных швов конструкции. Разработанная программа расчета напряженного состояния позволяет оптимизировать упругие мембраны ТП с целью получения наилучших метрологических характеристик датчиков на их основе.

Работа [10] посвящена вопросам моделирования деформаций мембран датчиков давления, в ней приводятся аналитические формулы, позволяющие путем численных расчетов установить деформации мембран с жестким центром и выбрать оптимальное расположение тензорезисторов на мембране. К сожалению, данные работы не рассматривают влияние дефектов конструкции ТП на его параметры и метрологические характеристики.

Таким образом, на основе анализа литературных источников мной было установлено, что до сих пор задача диагностики состояния наиболее важной части датчика давления – измерительного преобразователя – полностью не решена и является актуальной. Несмотря на то, что идея самоконтроля не ограничивается диагностикой состояния, обнаружение возникающих неисправностей является важной частью самоконтроля. Этим обусловлена необходимость разработки соответствующих моделей и методов, позволяющих обнаружить неисправность и определить ее тип.

1.5 Общие принципы обработки информации для контроля метрологического состояния датчиков

Обработка информации для контроля метрологического состояния датчиков на месте эксплуатации в данной работе рассматривается с точки зрения способности интеллектуальных датчиков проводить метрологический самоконтроль с выдачей информации о результате самоконтроля в систему управления технологическим производством. Метрологический самоконтроль датчиков на месте эксплуатации открывает возможности:

- контролировать изменение погрешности конкретного датчика и тем самым оценивать достоверность передаваемой датчиком информации;

- прогнозировать его метрологический отказ и производить замену перед началом проведения ответственных работ, во время проведения которых отказ датчика может привести к большим материальным и финансовым затратам, а то и аварии (например, на АЭС).

Работы по метрологическому самоконтролю (самоаттестации) датчиков начались в 1980-х годах [20] с внедрением в средства измерения микропроцессорной техники и разработкой цифровых полевых шин. Основными проблемами по использованию метрологического самоконтроля в датчиках являются разработка понятной для эксплуатационного персонала метрики качества измерений, т.е. понятной интерпретации информации о результате метрологического самоконтроля и индивидуальность методов метрологического самоконтроля для различных типов датчиков. Но главной преградой по внедрению метрологического самоконтроля в массовое производство датчиков является отсутствие 100 % достоверности его результатов при любых методах метрологического самоконтроля, а стоимость датчика за счет включения функции метрологического самоконтроля существенно возрастает. Только калибровка датчика с использованием эталона (меры высшего разряда), находящегося в нормальных условиях, позволяет гарантировать требуемые метрологические характеристики датчиков. По-видимому, основной областью применения датчиков с метрологическим самоконтролем будут особо опасные технологические производства типа АЭС, где возрастание стоимости датчика за счет включения опции метрологического контроля окупается необходимостью увеличения достоверности получаемой от датчика информации.

Важным этапом по разработке метрики качества измерений явилось утверждение международных и отечественных [84, 85] нормативных документов, посвященных метрологическому самоконтролю интеллектуальных датчиков и систем. По определению, данному в [85], интеллектуальные датчики должны обладать функцией метрологического самоконтроля, т.е. функцией автоматической проверки метрологической исправности датчика в процессе его эксплуатации, осуществляемой с использованием принятого опорного значения,

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

формируемого с помощью встроенного в датчик средства (измерительного преобразователя или меры) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала.

В результате метрологического самоконтроля интеллектуальные датчики должны формировать статус результата измерений, позволяющий снизить риск использования недостоверных результатов измерений при управлении оборудованием и контроле качества продукции. Статус результата измерений дает основание для суждения о необходимости и срочности обслуживания датчика.

В современной практике [22] применяют пять или три основных статуса результата измерений, которые можно назвать следующим образом: «подтвержденный», «нормальный», «ориентирующий», «экстраполированный», «недостоверный». Статус «подтвержденный» указывает, что результат измерений подтвержден дополнительной информацией о метрологической исправности и риск использования недостоверного результата пренебрежительно мал. Этот статус желателен при принятии ответственных решений по управлению оборудованием. Статус «подтвержденный» может быть присвоен результату измерений при поступлении информации о метрологической исправности от датчика.

Статус «нормальный» указывает, что риск использования недостоверного результата измерений невелик, что позволяет, например, принять решение по управлению оборудованием в обычной ситуации. Этот статус может быть присвоен результату измерений, полученному в течение межкалибровочного интервала от датчика, метрологическая исправность которого не проверяется автоматически в процессе эксплуатации.

Статус «ориентирующий» указывает, что риск использования недостоверного результата измерений повышен из-за появления дефекта в средстве измерений, но результат измерений может быть применен для ориентировочно оценки состояния оборудования и хода контролируемого технологического процесса. Статус «ориентирующий» достаточен для принятия решения в случае, например,

когда параметры технологического процесса далеки от предельно допускаемых. Присвоение результату измерений статуса «ориентирующий» указывает на необходимость выполнения обслуживания средства измерений и установления сроков этого обслуживания.

Статус «экстраполированный» указывает, что в качестве результата измерений используется результат, полученный путем экстраполяции данных из предыдущего интервала времени, поскольку поступающая измерительная информация недостоверна в течение известного (достаточно короткого) интервала времени. Статус «экстраполированный» дает основание, например, для задержки принятия ответственного решения по управлению оборудованием до появления достоверной информации или принятия некоего осторожного решения, ориентируясь на гипотезу, что в течение этого известного интервала времени состояние оборудования и ход контролируемого технологического процесса не претерпят заметных изменений.

Статус «недостоверный» указывает, что риск использования недостоверного результата измерений велик. Следует принять решение о выполнении обслуживания средства измерений.

Совокупность статусов «подтвержденный» или «нормальный», «ориентирующий» или «экстраполированный», а также «недостоверный» соответствует трехзонной системе оценке риска по [86].

Интеллектуальные датчики создают техническую основу для установления двух значений межповерочных (межкалибровочных) интервалов (при эксплуатации с использованием функции метрологического самоконтроля и без нее) [85]. Важную роль в обеспечении достоверности передаваемой датчиком информации играет правильность определения межповерочного интервала.

При изменении физико-химических свойств материалов сенсора и электрических параметров АЦП, возникающих вследствие процесса старения и воздействия эксплуатационных факторов, коэффициенты a_{ij} полинома (В.4) перестают соответствовать действительной обратной функции преобразования и метрологическая характеристика (МХ) датчика в какой-то момент превысит

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

допустимый предел, что приведет к метрологическому отказу. Для предотвращения появления таких отказов при эксплуатации средств измерения (СИ) необходимо определить межповерочный интервал (МПИ), ограниченный сверху вероятностной гарантией отсутствия метрологических отказов и ограниченный снизу экономическими затратами на поверку.

Методы определения МПИ сформированы в [87], где «назначение МПИ осуществляется на основании моделирования зависимости показателей точности или метрологической надежности от времени (наработки), прошедшей с момента последней поверки». Датчики в процессе эксплуатации подвергаются множеству эксплуатационных факторов, влияющих на скорость старения (износа) элементов. Например, на скорость старения элементов влияет температура: при изменении температуры от 20 до 40 °С скорость старения электронных элементов возрастает в 1,4...1,6 раза [88]. К сожалению, в [87] никак не оговаривается влияние эксплуатационных факторов на величину МПИ и результат моделирования зависимости показателей точности только от времени приведет к значительной погрешности определения МПИ.

Длительность МПИ определяется метрологическим запасом, формируемым на предприятии – изготовителе при первичной калибровке датчиков, и скоростью старения материалов датчика, зависящей от времени [89] и эксплуатационных факторов. Так как условия эксплуатации датчиков на заводе – изготовителе обычно заранее не известны, то предлагается вместо фиксированного значения МПИ в нормативной документации указывать диапазон МПИ: максимальное значение при самых благоприятных условиях и минимальное значение – при самых неблагоприятных условиях. Определение индивидуального МПИ каждого датчика на месте эксплуатации может быть произведено путем сравнения текущего ожидаемого значения M_X с допустимым значением. Текущее ожидаемое значение M_X (в качестве M_X для датчиков целесообразно использовать приведенную погрешность σ_M при максимальном значении входной величины) может быть определено следующими методами:

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1) прогнозирования изменения σ_M от времени и эксплуатационных факторов;

2) автоматизация контроля σ_M на месте эксплуатации.

Составление математической модели старения датчика от всех эксплуатационных факторов практически не реализуемо, в особенности учитывая ограниченные вычислительные возможности датчиков по сравнению с персональным компьютером. Поэтому для прогнозирования изменения σ_M необходимо выделить из всех эксплуатационных факторов один, наиболее влияющий на сенсор датчика, так как АЦП датчика имеет значительно большую метрологическую надежность по сравнению с сенсором. Для большинства областей применения рассматриваемых датчиков наиболее влияющим эксплуатационным фактором является температура окружающей сенсор среды.

Примем следующие допущения: скорость старения от времени между двумя соседними поверками не изменяется [87], скорость старения в зависимости от температуры изменяется линейно [89]. Тогда экстраполяционную функцию можно представить в виде:

$$\sigma_M = \sigma_{M0} + (b_0 + b_1 t)T = \sigma_{M0} + \sum_{i=0}^n (b_0 + b_1 t_i) \Delta T ,$$

где σ_{M0} – МХ на момент калибровки датчика; t – температура окружающей сенсор среды; T – время работы датчика (совпадающее практически с календарным, так как датчики работают в непрерывном режиме); t_i – температура окружающей сенсор среды в i момент выдачи кода АЦП; ΔT – период дискретизации входной величины (период выдачи кода АЦП).

Коэффициенты b_0 и b_1 находят в результате проведения испытаний каждого датчика на изменение времени и температуры окружающей среды: помещают датчики в климатическую камеру, устанавливают в ней минимальную температуру диапазона изменения температуры окружающей среды, выдерживают датчики в камере фиксированное время, регистрируют изменение МХ каждого датчика за это время, производят аналогичную процедуру для максимальной температуры диапазона изменения температуры окружающей среды.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для уменьшения длительности этих испытаний необходимо максимально увеличить точность и чувствительность датчиков, что возможно при условии использования предложенных в данной работе методологии обработки информации для калибровки датчиков.

Метрологический самоконтроль датчиков может быть реализован в форме метрологического прямого или метрологического диагностического самоконтроля [85]. Метрологический прямой самоконтроль датчика осуществляется путем оценки отклонения значения измеряемой величины от принятого опорного значения, формируемого встроенным средством (измерительным преобразователем или мерой) более высокой точности. Метрологический диагностический самоконтроль датчика осуществляется путем оценки отклонения параметра, характеризующего критическую (доминирующую или склонную к быстрому росту) составляющую погрешности от принятого опорного значения этого параметра.

Классификация методов организации метрологического самоконтроля датчиков, предложенная в [21], представлена в табл. 1.5.1.

Таблица 1.5.1

Метрологический самоконтроль датчиков						
С применением встроенных «эталонов»			С применением близких по точности сигналов или параметров одного изделия			
На основе калибров	На основе дополнительных датчиков более высокой точности	Комбинация встроенных калибров и дополнительных датчиков	На основе нескольких одинаковых датчиков	На основе различных сигналов или параметров одного изделия		
				Избыточность внутри (за счет избыточности)	избыточность извне (за счет избыточности)	комбинация обоих типов избыточности

использование которого предполагает изменение частотной характеристики системы при появлении неисправностей [151].

Одним из основных параметров, характеризующих любой измерительный датчик, является его динамическая характеристика [54]. Рассматриваемые в данном исследовании измерительные датчики давления являются электромеханической конструкцией, и их выходной электрический сигнал содержит информацию о динамических характеристиках датчика. Предположив, что техническое состояние датчика влияет на его частотные характеристики, которые могут быть определены путем анализа выходного сигнала, можно создать методику обнаружения неисправностей сенсора на основе анализа сигнала и оценки его частотной характеристики.

Рассмотрим упрощенную модель датчика давления в виде системы с одним входом и одним выходом, которая изображена на рисунке 1.4.1. Здесь $x(t)$ и $y(t)$ – наблюдаемые входные и выходные реализации стационарных процессов, $n(t)$ – ненаблюдаемый внешний шум, $H(f)$ – частотная характеристика системы, преобразующей $x(t)$ в $y(t)$. В качестве входного процесса выступает внешнее воздействие (давление) на мембрану датчика, в качестве выходного процесса – электрический сигнал тензомоста (напряжение).

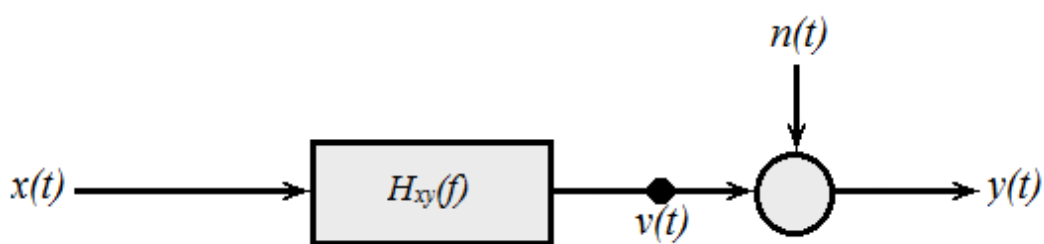


Рис. 1.6.1. - Система с одним выходом, одним входом и шумом на входе

В теории систем важную роль играют линейные системы с постоянными параметрами. В этом случае динамические свойства датчика определяются его частотной характеристикой. В случае, если внешним шумом на входе и выходе можно пренебречь, оценку амплитудной составляющей частотной характеристики можно построить, зная лишь оценки входной и выходной спектральных

плотностей [12]. Рассматривая датчик давления, как линейную систему с постоянными параметрами и применяя известные соотношения из теории линейных систем, можно записать следующее. Временной отклик датчика $y(t)$ на входное воздействие $x(t)$ определяется сверткой этого воздействия и импульсной характеристики

датчика как системы $h(t)$:

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (1.6.1)$$

В частотной области это соотношение преобразуется в произведение Фурье-образов:

$$Y(f) = H(f)X(f), \quad (1.6.2)$$

где $Y(f)$, $H(f)$, $X(f)$ – Фурье-образы выходного сигнала $y(t)$, импульсной характеристики системы $h(t)$ и входного сигнала $x(t)$ соответственно.

Из выражения (1.4.2) можно вывести (см. [12]) следующее соотношение, полезное при практическом определении амплитудно-частотной характеристики датчика:

$$G_{yy}(f) = |H(f)|^2 G_{xx}(f), \quad (1.6.3)$$

где $G_{xx}(f)$ и $G_{yy}(f)$ – спектральные плотности входного и выходного процесса соответственно, $H(f)$ – искомая частотная характеристика.

Под постоянством параметров датчика давления как системы в данном случае подразумевается постоянство его свойств, характеризующих определенное техническое состояние датчика. При изменении технического состояния его свойства будут изменяться, соответственно изменится преобразование входного процесса в выходной.

Существуют разные способы описания динамических свойств средств измерений. Согласно ГОСТ 8.009-84 [22] динамические характеристики средств измерений разделяются на полные и частные. К полным относятся следующие: переходная характеристика; импульсная переходная характеристика; амплитудно-

фазовая характеристика; амплитудно-частотная характеристика для минимально-фазовых СИ; совокупность амплитудно-частотной и фазово-частотной характеристик; передаточная функция.

Полная динамическая характеристика однозначно определяет изменение информативного параметра выходного сигнала устройства при любом изменении во времени информативного или неинформативного параметра входного сигнала или влияющей величины.

К частным динамическим характеристикам относят любые функционалы или параметры полных динамических характеристик, например, время реакции; коэффициент демпфирования; постоянная времени; значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте; значение резонансной собственной круговой частоты.

В данном исследовании для целей диагностики технического состояния датчика давления по его динамическим характеристикам рассматривается амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и значения резонансных собственных частот ω_0 датчика. Для оценки АЧХ датчика используется комбинация экспериментальных и численных методов. Как упоминалось ранее, рассматриваемые в данном исследовании измерительные датчики давления обладают электромеханической конструкцией и, следовательно, для них справедливы положения теории колебаний.

1.7 Обзор аналогов

Емкостный датчик - преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение емкостного сопротивления.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29



Рисунок 1.6.1 – Емкостный датчик давления

Области применения емкостных датчиков

Возможные области применения емкостных датчиков чрезвычайно разнообразны. Они используются в системах регулирования и управления производственными процессами почти во всех отраслях промышленности. Емкостные датчики применяются для контроля заполнения резервуаров жидким, порошкообразным или зернистым веществом, как конечные выключатели на автоматизированных линиях, конвейерах, роботах, обрабатывающих центрах, станках, в системах сигнализации, для позиционирования различных механизмов и т. д.

В настоящее время наиболее широкое распространение получили датчики приближения (присутствия), которые помимо своей надежности, имеют широкий ряд преимуществ. Имея сравнительно низкую стоимость, датчики приближения охватывают огромный спектр направленности по своему применению во всех отраслях промышленности. Типичными областями использования емкостных датчиков этого типа являются:

- сигнализация заполнения емкостей из пластика или стекла;
- контроль уровня заполнения прозрачных упаковок;
- сигнализация обрыва обмоточного провода;
- регулирование натяжения ленты;
- поштучный счет любого вида и др.

Емкостные датчики линейных и угловых перемещений являются наиболее распространенными приборами, широко используемыми в машиностроении и на транспорте, строительстве и энергетике, в различных измерительных комплексах.

Тензорезистивный датчик

Наиболее метрологически ненадежной частью тензорезистивных датчиков давления является сенсор. На изменение параметров сенсора от времени сильно влияют внешние условия, основным из которых является температура. Экспериментальные исследования сенсоров на основе КНС структуры [95] показывают следующие результаты. Типичные результаты изменения параметров сенсора после 250 термоциклов при $T = -40...+80$ °С (в % от диапазона изменения выходного сигнала) приведены в таблице 1.

Таблица 1.7.1

Начальный выходной сигнал	±0,1
Чувствительность	±0,05
Нелинейность	±0,03
Вариация	±0,02
Повторяемость	±0,03
Точность	±0,05

Предлагается метод контроля метрологического состояния сенсора [137], использованный в датчике давления, функциональная схема которого приведена на рисунке 2, где ДТ – датчик температуры сенсора.

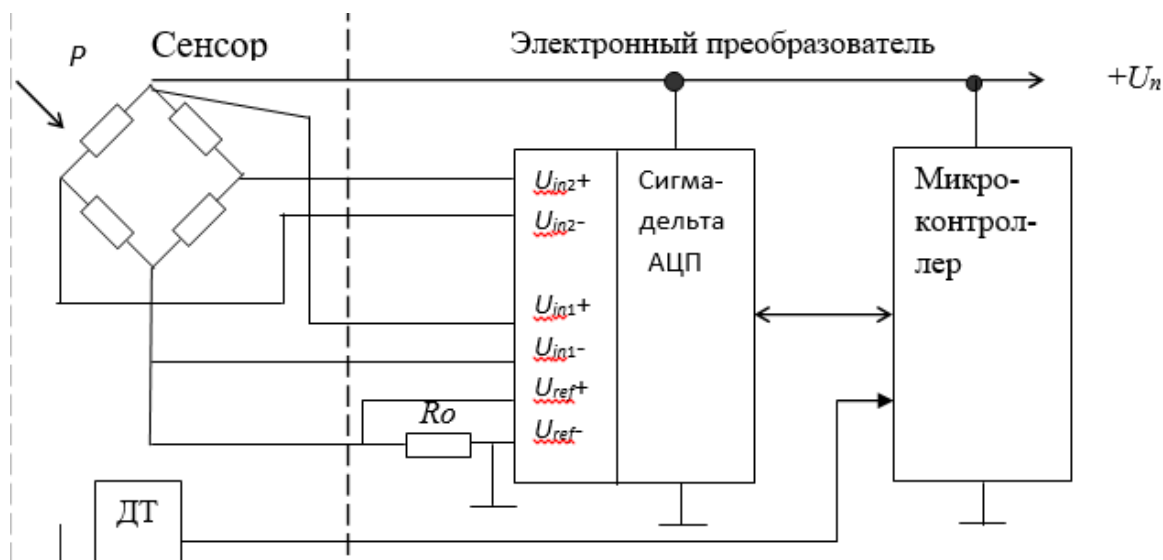


Рисунок 1.7.1 - Функциональная схема датчика давления с функцией диагностики

Для вычисления давления p микроконтроллер использует формулы:

$$\hat{r} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k a_{ij} Nu_2^i Ntv^j, \quad (1.7.1)$$

$$\widehat{R}_m = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^k b_{ij} Nu_1^i Ntv^j, \quad (1.7.2)$$

$$\hat{p} = \sum_{i=0}^{n1} \sum_{j=0}^{k1} c_{ij} \hat{r}^i N_{ДТ}^j, \quad (1.7.3)$$

где \hat{r} – оценка сопротивления r разбаланса тензорезистивного моста; Nu_2 – выходной код АЦП от преобразования напряжения U_{in2} ; Ntv – код, полученный от измерения температуры окружающего ЭП воздуха с помощью встроенных в микроконтроллер термодиода и АЦП; \widehat{R}_m – оценка общего сопротивления R_m моста; Nu_1 – выходной код АЦП от преобразования напряжения U_{in1} ; $N_{ДТ}$ – код, полученный в микроконтроллере по выходному сигналу ДТ.

Вводится функция диагностики f_d :

$$f_d = \sum_{i=0}^{n2} \sum_{j=0}^{k2} d_{ij} (\widehat{R}_m - k\hat{p})^i N_{ДТ}^j, \quad (1.7.4)$$

где коэффициент k рассчитывается по формуле (6.3), коэффициенты d_{ij} получают решением системы $(n2+1) \cdot (k2+1)$ уравнений, для составления которых значения \widehat{R}_m и $N_{ДТ}$ получают при калибровке датчика давления, значения k и \hat{p}

рассчитывают после проведения калибровки датчика давления, а значения f_d для всех уравнений принимают равными некоему номинальному значению.

На функцию диагностики f_d влияет только изменение общего сопротивления тензорезистивного моста от времени и не влияет изменение температуры моста и измеряемого давления. Отклонение функции диагностики от номинального значения показывает происходящие изменения в характеристике тензорезистивного моста от времени и по величине отклонения можно судить об изменении погрешности измерения давления.

Если датчик давления находится в таких условиях эксплуатации, для которых характерны резкие изменения температуры окружающей среды, то более лучшим решением [140] является использование датчика давления, у которого температура сенсора определяется по общему сопротивлению тензорезистивного моста. Расчет давления производится микроконтроллером по формулам (5.4), (5.5), (5.6), а расчет температуры сенсора – по формуле (6.2).

В моменты времени, когда скорость изменения температуры, окружающей сенсор среды мала, температура, вычисляемая по формуле (6.2) сравнивается с температурой, определяемой по выходному сигналу датчика температуры. Рассогласование этих температур показывает происходящие изменения в характеристике тензорезистивного моста от времени и по величине отклонения можно судить об изменении погрешности измерения давления.

При более сложной конструкции датчика давления необходимо диагностировать не только измерительную мембрану с тензорезистивным мостом, но и механизм передачи давления на измерительную мембрану. Для решения данной проблемы предлагается способ и устройство измерения давления [138], функциональная схема которого приведена на рис. 8.7, где ПЭ – пьезоэлектрический элемент, ФНЧ – фильтр низкой частоты, ПФ – полосовой фильтр, У – усилитель, В – выпрямитель.

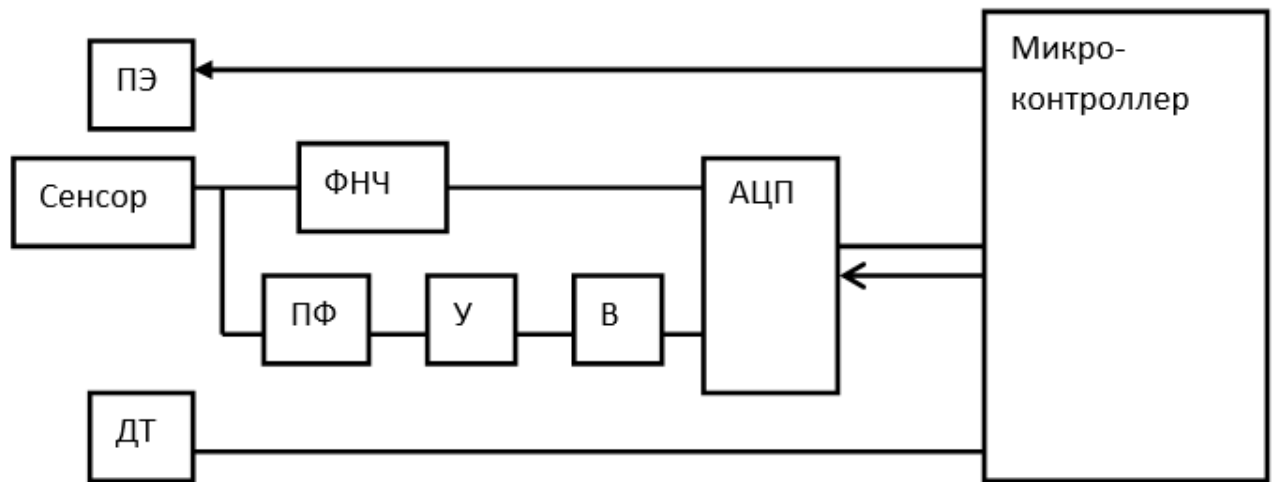


Рисунок 1.7.1 - Функциональная схема датчика давления с расширенной диагностикой

В исследуемой среде осуществляют формирование механических колебаний путем подачи на вход ПЭ, расположенного вблизи сенсора давления, электрических импульсов с выхода микроконтроллера (используя, например, выход микроконтроллера с широтно-импульсной модуляцией). Частота импульсов формируется программно таким образом, чтобы превышать максимально возможную частоту колебаний давления исследуемой среды и не выходить за полосу пропускания самого сенсора давления.

Выходной сигнал сенсора, содержащий информацию о рабочем давлении исследуемой среды и переменном эталонном давлении, поступает на вход ФНЧ, на выходе которого формируется сигнал о рабочем давлении, и на вход ПФ, на выходе которого присутствует сигнал, соответствующий переменному давлению. После усиления и выпрямления этот сигнал поступает на второй вход АЦП, в котором после преобразования получается код N_{\sim} .

Микроконтроллер рассчитывает функцию диагностики f_d по формуле:

$$f_d = \sum_{i=0}^{n2} \sum_{j=0}^{k2} \sum_{l=0}^z d_{ijl} N_{\sim}^i N_{ДТ}^j \hat{p}^l$$

(1.7.5)

Коэффициенты d_{ijl} получают решением системы $(n2+1) \cdot (k2+1) \cdot (l+1)$ уравнений, для составления которых значения N_{\sim} и $N_{ДТ}$ получают при

калибровке датчика давления, значение \hat{p} рассчитывают после проведения калибровки датчика давления, а значения f_d для всех уравнений принимают равными некоему номинальному значению.

На функцию диагностики f_d влияет только изменение параметров сенсора давления от времени и не влияет изменение температуры сенсора и измеряемого давления. Отклонение функции диагностики от номинального значения показывает происходящие изменения в характеристике сенсора от времени и по величине отклонения можно судить об изменении погрешности измерения давления. К тому же постоянно существующее переменное давление, оказываемое ПЭ, значительно снижает гистерезисные явления в сенсоре.

Цифровой преобразователь углового положения

Цифровой преобразователь угла (ЦПУ) в качестве первичного преобразователя (сенсора) содержит синусно-косинусный вращающийся трансформатор (СКВТ), а во вторичном (электронном) преобразователе используется метод «гармонического осциллятора» [90]. Модернизированная функциональная схема [127] такого ЦПУ приведена на рис. 8.1, где $U_0 \sin wt$ – опорное напряжение СКВТ, θ – измеряемый угол, Кл1 и Кл2 – аналоговые переключатели. Цифровая схема была выполнена на микросхемах средней степени интеграции: логические элементы, триггеры, счетчики, регистры.

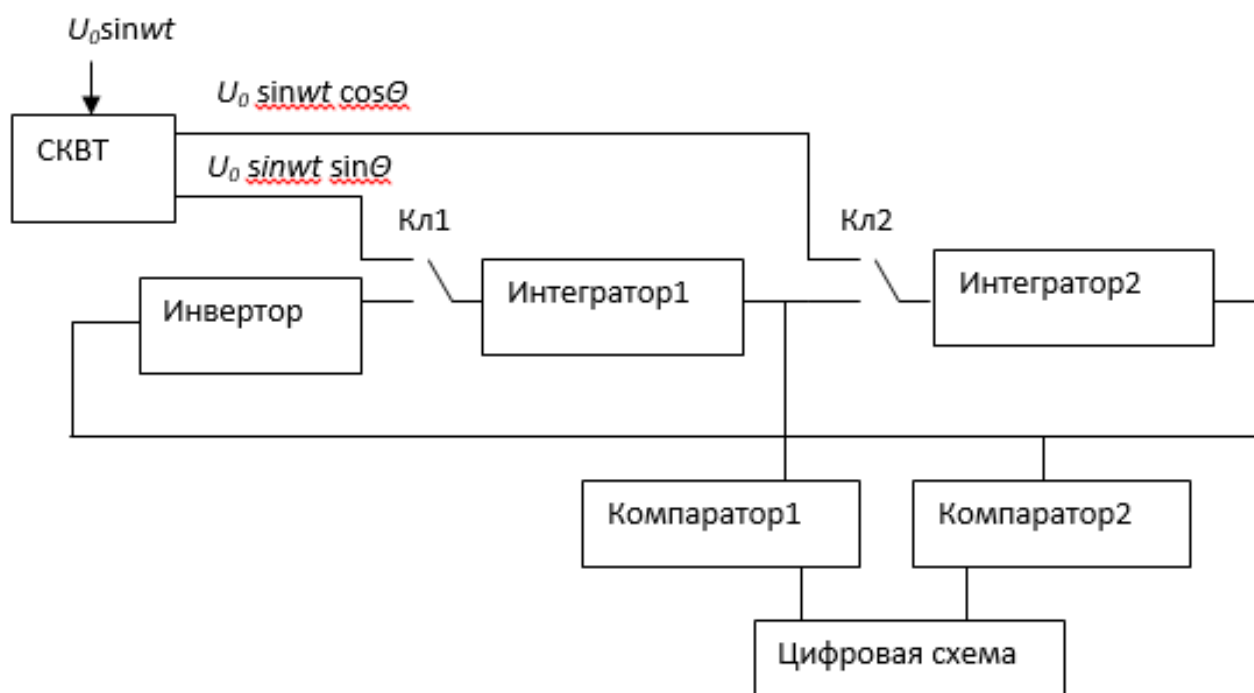


Рисунок 1.7.1 - Функциональная схема ЦПУ

ЦПУ работает в три такта.

На первом такте выходные сигналы СКВТ на время положительной полуволны опорного напряжения поступают на входы предварительно обнуленных интеграторов. По окончании первого такта, имеющего длительность t_1 , на выходах U_1 и U_2 интеграторов сформируются напряжения:

$$U_1 = \frac{U \sin \theta \cdot t_1}{T_1},$$

$$U_2 = \frac{U \cos \theta \cdot t_1}{T_2},$$

где T_1, T_2 – постоянные времени интеграторов 1 и 2.

На втором такте переключатели Кл1 и Кл2 замыкают два интегратора и инвертор в кольцо, образуя колебательный контур, описываемый уравнением:

$$\ddot{U} + \frac{U}{T_1 \cdot T_2} = 0, \quad (8.1)$$

где ω_0 – круговая частота колебательного контура:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{T_1 \cdot T_2}}.$$

При ближайшем пересечении нуля одним из интеграторов срабатывает соответствующий компаратор и полученная длительность второго такта

преобразуется цифровой схемой с помощью встроенного генератора частоты f_c в код N_θ :

$$N_\theta = \tan^{-1}(\tan\theta \sqrt{T1/T2}) \cdot f_c/w_0 .$$

На третьем такте интеграторы обнуляются.

Временная диаграмма работы электронного преобразователя при угле θ , расположенном в первом квадранте, приведена на рис. 8.2.

Для того чтобы N_θ был прямо пропорционален θ необходимо соблюдение двух условий:

- $T1 = T2 = T ,$ (8.2)

- $T = \frac{360^\circ}{2\pi \cdot f_c \cdot p_{\text{мр}}},$ (8.3)

где $p_{\text{мр}}$ – вес младшего разряда кода угла в градусах.

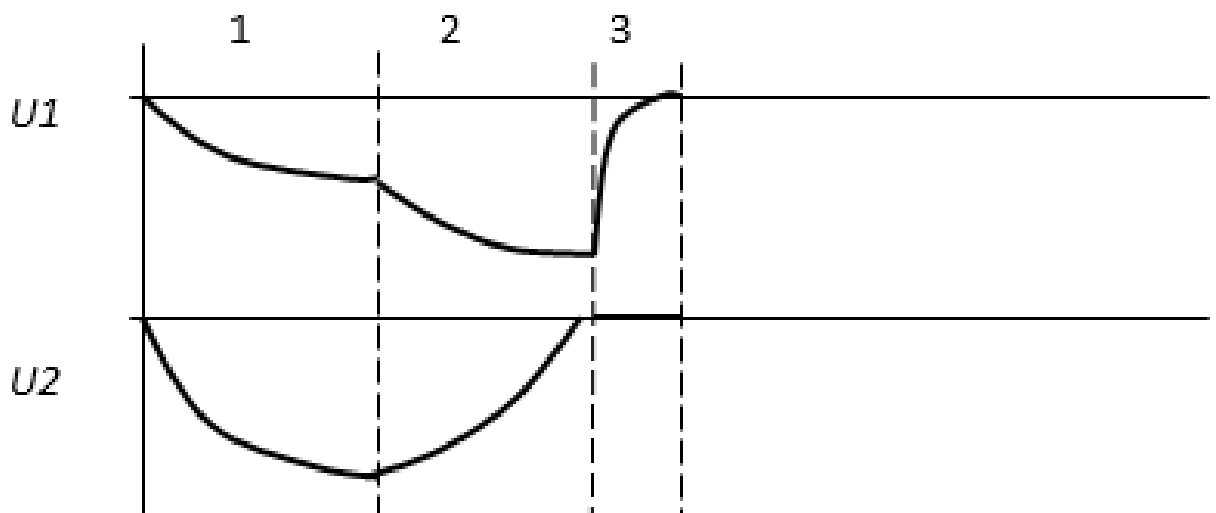


Рисунок 1.7.2 - Временная диаграмма работы электронного преобразователя ЦПУ

Т.е. постоянные времени интеграторов должны быть одинаковыми и равны определенному значению. При построении интеграторов по схеме, приведенной на рис. 8.3, постоянная времени интегратора $T = (R1+R2)C1$. При калибровке ЦПУ необходимо с помощью переменных резисторов $R2$, стоящих в каждом интеграторе, постараться выполнить условия (8.2), (8.3).

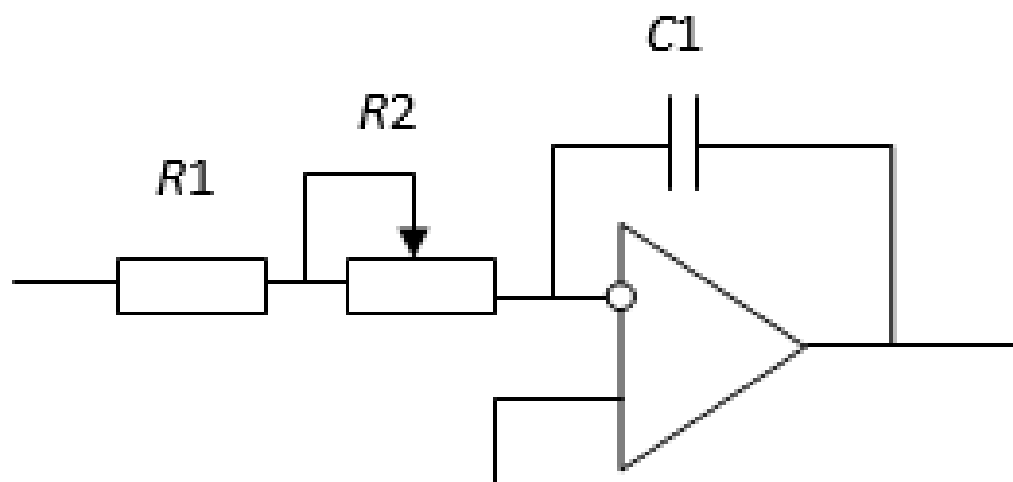


Рисунок 1.7.3 - Функциональная схема интегратора

Методика выполнения такой ручной калибровки очень сложна и требует дополнительного оборудования, устанавливаемого на электронном преобразователе ЦПУ. К тому же уравнение (8.1) очень упрощенно описывает работу преобразователя, т.к. в этом уравнении не учтены такие параметры аналоговых элементов, как напряжения смещения операционных усилителей и компараторов, задержки аналоговых переключателей и компараторов, $\tan \delta$ конденсатора интегратора, а также влияние температуры окружающей среды.

С появлением микроконтроллеров стало возможным использование методов обработки информации для калибровки ЦПУ.

Для выравнивания постоянных времени интеграторов ЦПУ вместо переменных резисторов $R2$ устанавливаются цифровые управляемые резисторы, сопротивление которых может быть изменено при изменении входного кода [127]. Используя идеальный эталонный сигнал, соответствующий 45° , и измеряя действительный период гармонических колебаний «осциллятора» можно сделать равными постоянные времени интеграторов и избавиться от необходимости выполнять условие (8.3) путем пропорционального изменения выходного кода ЦПУ в

соответствии с отличием реального периода гармонических колебаний от расчетного значения [128]. Если режим коррекции выполнять периодически, то

будет компенсироваться изменение параметров аналоговых элементов из-за изменения температуры окружающей среды и их старения.

1.8 Выбор среды моделирования

Инженерная компьютерная графика является одной из наиболее интенсивно развивающихся отраслей технических знаний. Современные CAD-подсистемы, входящие в состав интегрированных CAD/CAM/CAE-систем (Computer Aided Manufacturing/Engineering - поддержанное компьютером конструирование/изготовление/инженерная деятельность), и системы твердотельного параметрического моделирования механических объектов, отражающие последние достижения инженерной компьютерной графики, представляют собой наиболее важные разработки в области новых технологий по автоматизации деятельности инженеров, конструкторов и технологов [10]. Эта оценка была сделана еще в конце 80-х годов прошлого века. К тому времени в мире было создано 40–50 трехмерных систем автоматизированного проектирования (САПР) [11].

Компас 3D.

КОМПАС-3D — система трехмерного проектирования, ставшая стандартом для тысяч предприятий, благодаря сочетанию простоты освоения и легкости работы с мощными функциональными возможностями твердотельного и поверхностного моделирования.

Ключевой особенностью продукта является использование собственного математического ядра С3D и параметрических технологий, разработанных специалистами АСКОН.

КОМПАС-3D обеспечивает поддержку наиболее распространенных форматов 3D-моделей (STEP, ACIS, IGES, DWG, DXF), что позволяет организовывать эффективный обмен данными со смежными организациями и заказчиками, использующими любые CAD / CAM / CAE-системы в работе.

Система КОМПАС-3D предназначена для создания трехмерных параметрических моделей и последующего выполнения сборочных чертежей, рабочих чертежей и спецификаций.

					ИОУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

Проектирование машиностроительных и приборостроительных изделий накладывает высокие требования к используемому инструменту. КОМПАС-3D соответствует самым современным требованиям. Возможности системы обеспечивают проектирование машиностроительных изделий любой сложности и в соответствии с самыми передовыми методиками проектирования. В системе присутствуют инструменты для работы по методу «сверху вниз» или методике нисходящего проектирования, а также по уже привычному всем методу «снизу вверх».

КОМПАС-3D как универсальная система трехмерного моделирования находит свое применение при решении различных задач в архитектурно-строительном и технологическом проектировании. Система обладает мощным функционалом для работы над проектами разнообразной направленности и сложности: от создания трехмерных ассоциативных моделей отдельных элементов и сборных конструкций из них до оформления проектной документации в соответствии со стандартами СПДС и ЕСКД. В системе присутствуют инструменты для работы по технологии интеллектуального строительного проектирования MinD.

Функциональные возможности КОМПАС-3D легко расширяются за счет приложений (для машиностроения, строительства и приборостроения), дополняющих систему эффективным инструментарием для решения специализированных инженерных задач.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		40

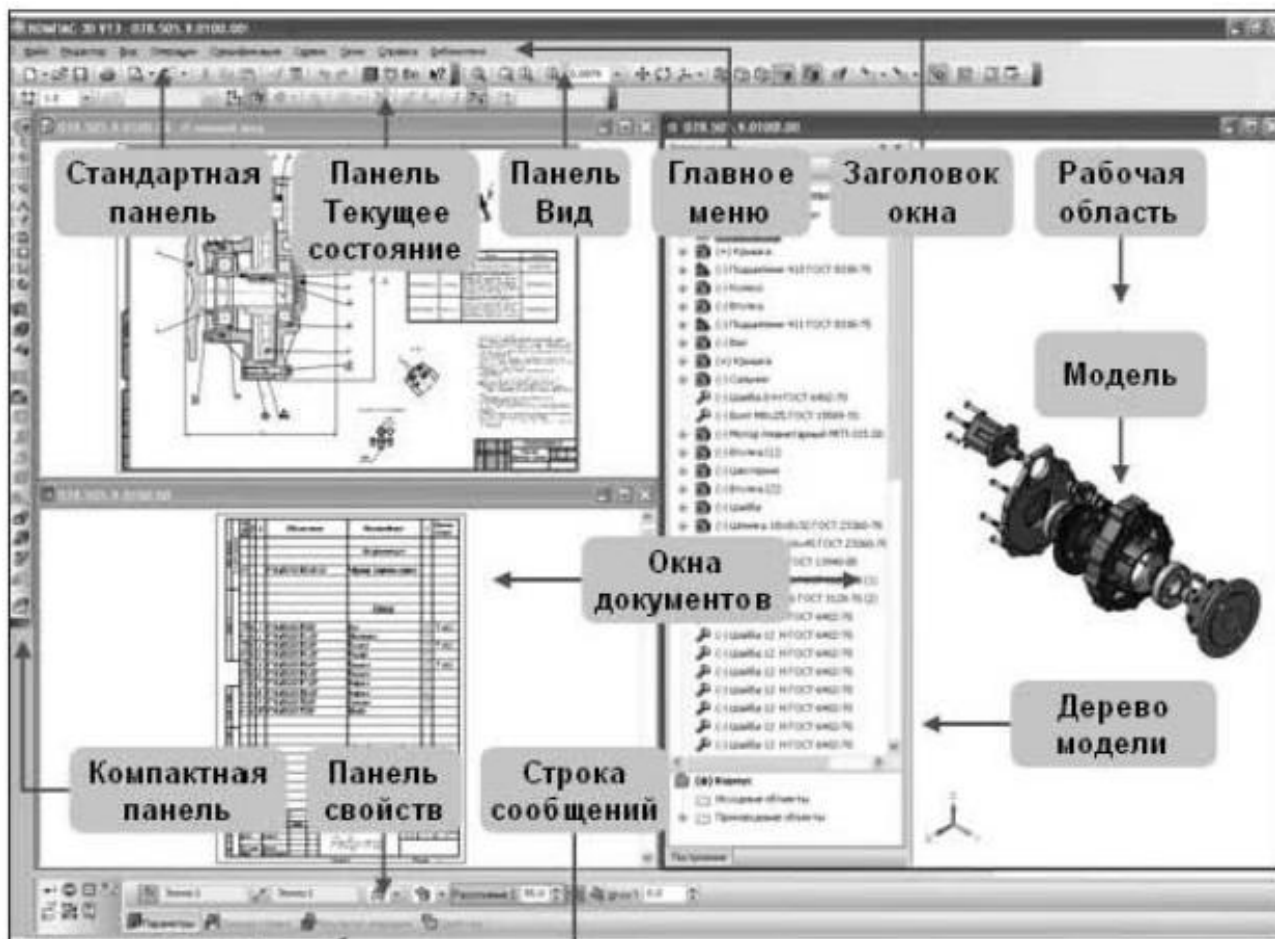


Рисунок 1.8.1 – Элементы интерфейса в режиме создания сборки

SolidWorks.

Система автоматизированного проектирования **SolidWorks** (SolidWorks Corporation, США) создана для использования на персональном компьютере в операционной среде Microsoft Windows.

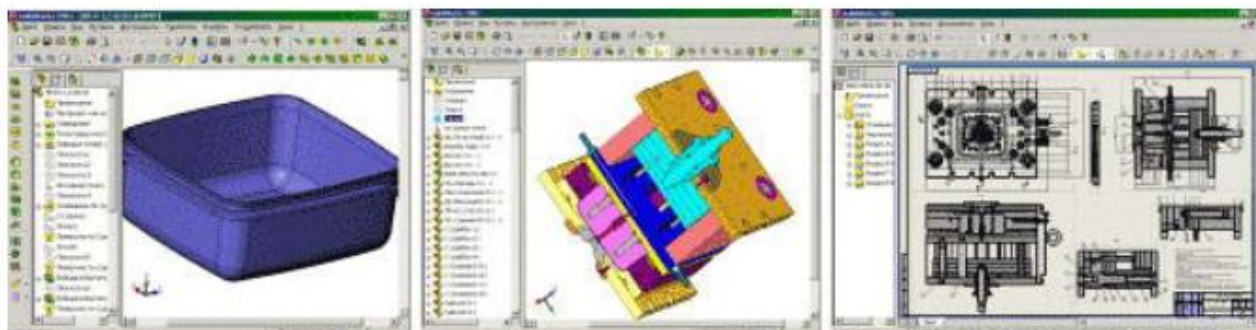


Рисунок 1.8.2 – Оформление SolidWorks

В SolidWorks используется принцип трехмерного твердотельного и

поверхностного параметрического проектирования, что позволяет конструктору создавать объемные детали и компоновать сборки в виде трехмерных электронных моделей, по которым создаются двухмерные чертежи и спецификации в соответствии с требованиями ЕСКД.

Трехмерное моделирование изделий дает массу преимуществ перед традиционным двумерным проектированием, например, исключение ошибок собираемости изделия еще на этапе проектирования, создание по электронной модели детали управляющей программы для обработки на станке с ЧПУ. С помощью программы SolidWorks можно увидеть будущее изделие со всех сторон в объеме и придать ему реалистичное отображение в соответствии с выбранным материалом для предварительной оценки дизайна.

Трехмерная деталь SolidWorks получается в результате комбинации трехмерных примитивов. Большинство элементов основаны на плоском эскизе, по которому создается базовый трехмерный объект. Последовательное наращивание 3D объектов и позволяет в итоге получить желаемый результат.

Двунаправленные ассоциативные взаимосвязи между деталями, сборками и их чертежами SolidWorks гарантируют соответствие модели и чертежа, так как все изменения, сделанные в детали автоматически передаются связанную с ней сборку и чертеж.

Опциональные модули SolidWorks позволяют расширить базовые возможности дополнительными функциями по:

- созданию фотореалистичных изображений (PhotoWorks);
- распознаванию дерева построения и параметризации геометрии, импортированной из других CAD систем (FeatureWorks);
- созданию презентационных видеороликов изделий в среде SolidWorks (SolidWorks Animator);
- трехмерной обводке кабелей электрических систем и трубопроводов (SolidWorks Routing);
- созданию автономно просматриваемых чертежей и моделей, для обмена информацией с партнерами не имеющими SolidWorks (eDrawings) и т.д.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Autodesk Inventor.

Autodesk Inventor поддерживает различные методы моделирования трехмерных моделей любой сложности. Можно гибко сочетать твердотельное и поверхностное моделирование, а также модели в виде треугольной сетки. При этом пользователю доступны различные методы создания и редактирования трехмерных объектов:

- традиционный параметрический метод, основанный на дереве построения из отдельных трехмерных элементов, включая построения по сечениям, а также на наборах параметров и зависимостей;
- свободное «скульптурное» моделирование на основе технологии T-сплайнов;
- прямая манипуляция элементами, гранями, ребрами и вершинами моделей, особенно помогающая при необходимости продолжить развитие модели, полученной из сторонних САПР.

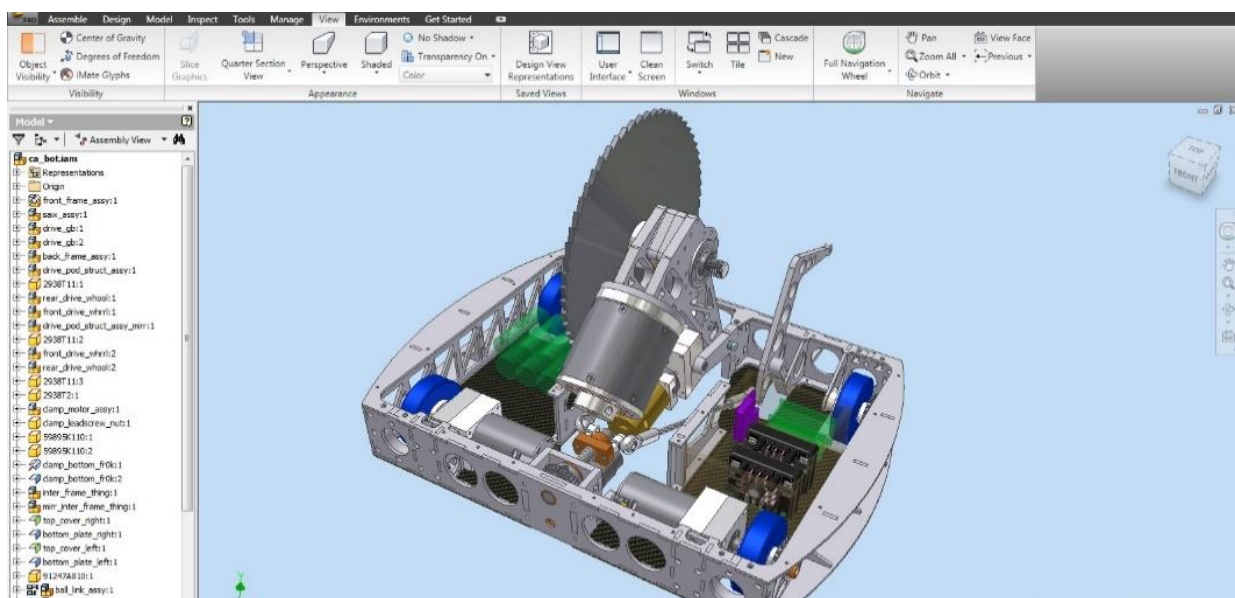


Рисунок 1.8.3 – Оформление Solid Works

Почти каждая трехмерная операция базируется на одном или нескольких эскизах. Autodesk Inventor оснащен мощнейшей средой 2D и 3D эскизирования, позволяющей создавать профили и траектории любой сложности.

					ИОУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

При построении можно в полном объеме пользоваться параметрическим ядром Inventor, задавать сложные взаимосвязи элементов эскиза как между собой, так и с другими элементами модели, как на уровне геометрии, так и на уровне параметров.

Возможно построение точных математических кривых по заданным уравнениям в декартовой, полярной или цилиндрической системах координат. Также возможно построение кривых по таблицам координат, импортированным из Microsoft Excel.

Среда эскизирования Autodesk Inventor поддерживает эскизные блоки, что позволяет создавать в рамках одного эскиза концептуальные схемы целых изделий, с последующим автоматическим получением на основе этих блоков сборки из отдельных деталей.

Среда построения эскизов оснащена широким набором вспомогательных инструментов, повышающих скорость и эффективность построения. Автоматические зависимости, управляемые привязки, контекстный ввод параметров и многое другое.

Ansys.

Универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, является довольно популярной у специалистов в сфере автоматических инженерных расчётов (CAE, Computer-Aided Engineering) и КЭ решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет избежать дорогостоящих и длительных циклов разработки типа «проектирование — изготовление — испытания». Система работает на основе геометрического ядра Parasolid.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

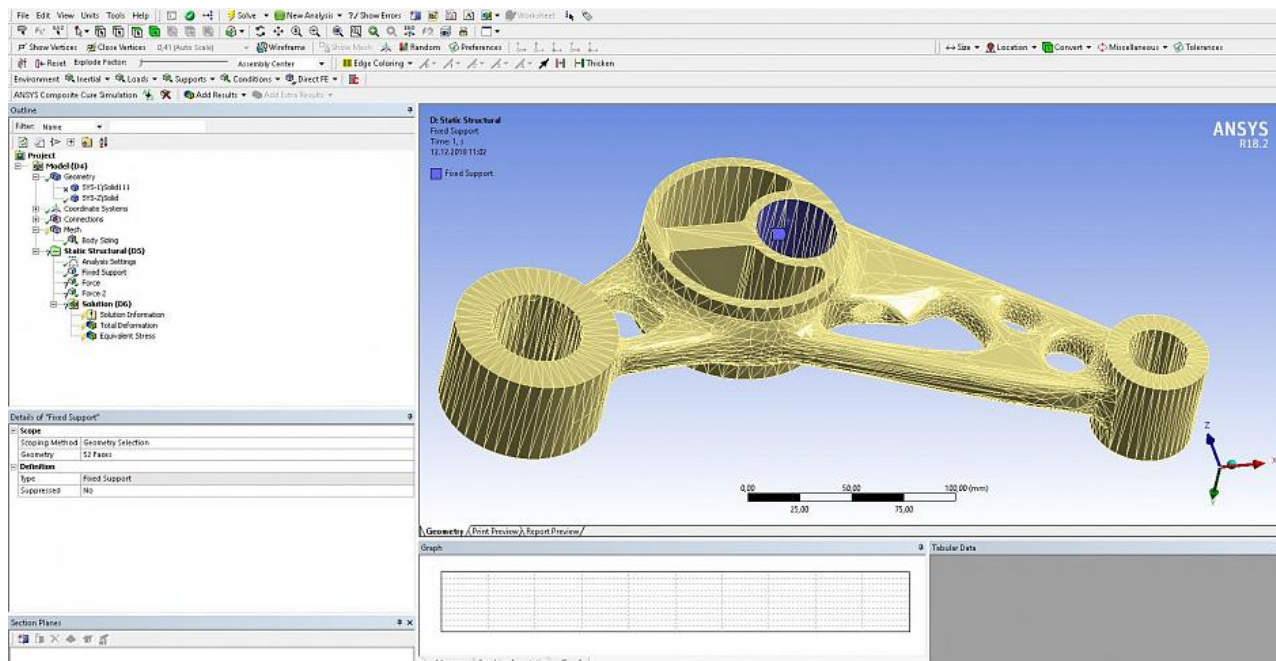


Рисунок 1.8.4 – Оформление Ansys

Программная система КЭ анализа ANSYS разрабатывается американской компанией Ansys Inc. Компания также выпустила другие системы КЭ моделирования, в том числе DesignSpace, AI Solutions (NASTRAN, ICFM CFD); предназначенные для использования в более специфических отраслях производства.

Выводы по разделу 1:

В ходе написания первого раздела был проведен анализ современных подходов к оценке технического состояния датчиков давления.

Были изучены основные программные обеспечения в области моделирования 3D моделей, а именно Компас 3D, SolidWorks, Autodesk Inventor и Ansys. В процессе изучения был выбран пакет SolidWorks.

При обзоре аналогов были сформулированы недостатки данных устройств, которые изменены в разрабатываемой конструкции.

В следующем разделе необходимо разработать модель первичного измерительного преобразовательного модуля (ПИП) датчика давления.

2 РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

В данном разделе описана система компьютерного моделирования датчика давления методом конечных элементов. Последовательность этапов моделирования показана на примере датчика давления с разделительной мембраной. Те же этапы осуществляют и при моделировании измерительных датчиков с иным типом конструкции.

2.1 Разработка системы компьютерного моделирования датчика давления

В диссертационном исследовании проводится моделирование датчиков давления методом конечных элементов в среде Solid Works. Процесс моделирования включает в себя следующие этапы:

1. Создание конечно-элементной модели датчика давления.
2. Проведение расчетов собственных колебаний конструкции датчика.

Рассматриваемая конструкция датчика представляет собой совокупность деталей и состоит из следующих частей (рис. 2.1.1). Защитный корпус (1) является основанием для крепления разделительной мембраны (2). Корпус самого датчика (3) имеет резьбовое соединение для крепления внутри защитного корпуса (все остальные части измерительной системы соединяются сварными швами). Также эта часть конструкции содержит канал для кремнийорганической жидкости (4). Данная жидкость необходима для передачи измеряемого давления на внутреннюю мембрану (5), которая в свою очередь жестко закреплена посредством штока с измерительной мембраной (6). На поверхности измерительной мембраны располагается чувствительный элемент – тонкая пластина, имеющая структуру «кремний-на-сапфире» (7).

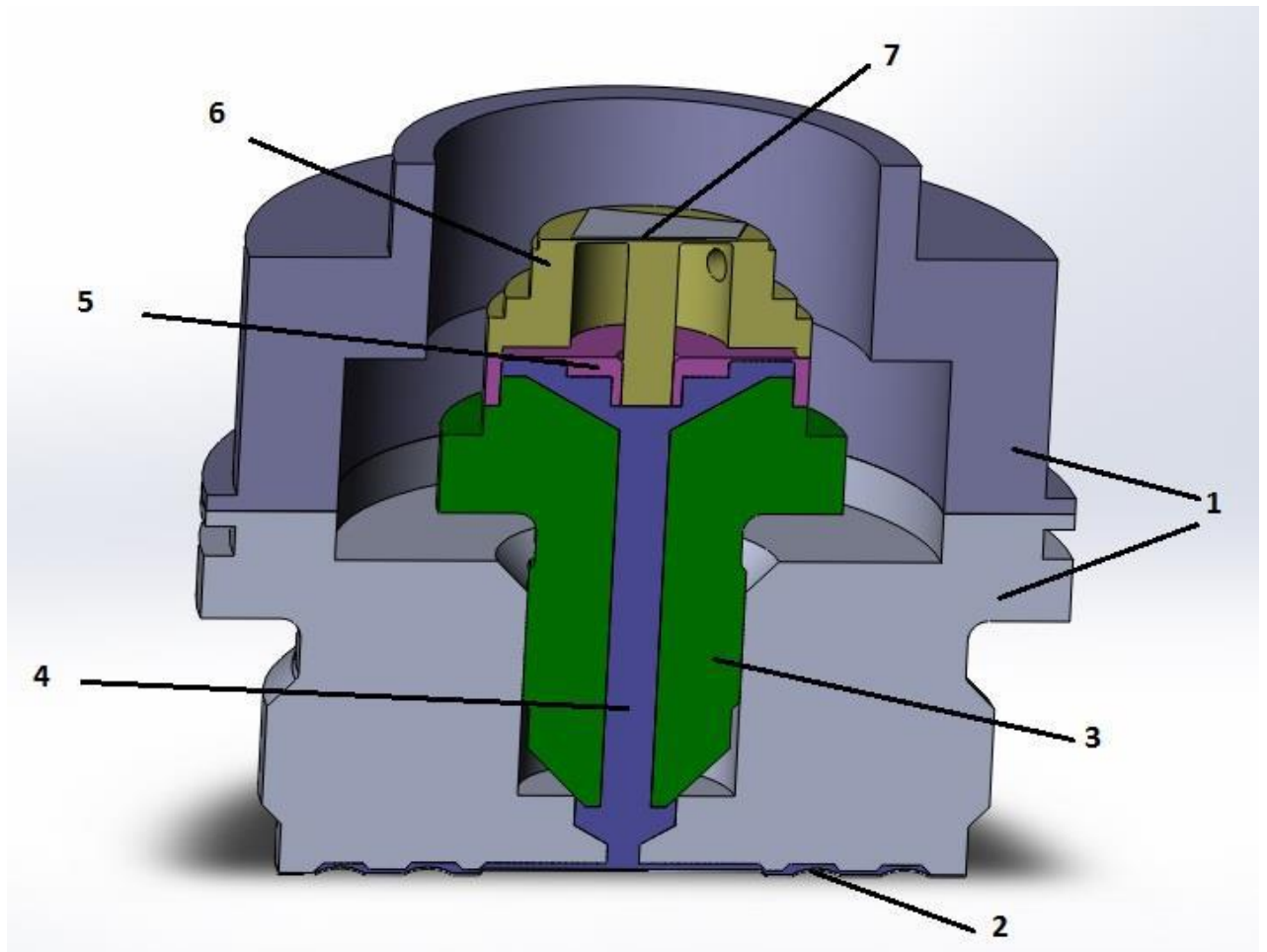


Рисунок 2.1.1 –Конструкция датчика давления с указанием составляющих частей

Создание модели преобразователя состоит из следующих этапов, указанных на рисунке 2.1.2.

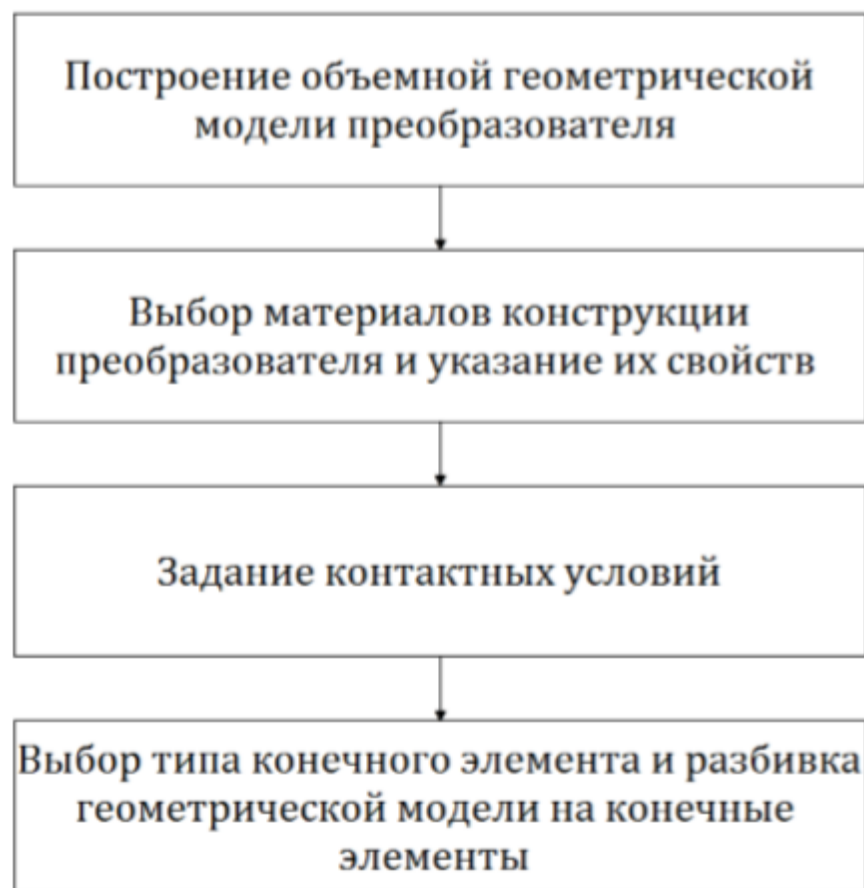


Рисунок 2.1.2 – Блок-схема этапов создания модели преобразователя

2.2 Создание объемной геометрической модели датчика

Геометрическая модель может быть создана в модуле Design Modeler или экспортирована из какого-либо САD-пакета. В данном исследовании объемная модель конструкции датчика давления выполнена в пакете SolidWorks. Вначале созданы отдельные детали конструкции датчика, а затем с помощью сопряжений объединены в сборку. Разработка деталей производилась в следующей последовательности:

- создание 2D эскиза;
- создание объемной 3D фигуры с помощью инструмента вращения.

В качестве примера рассмотрим построение основной части измерительного датчика. На рисунке 2.1.3 представлен эскиз, созданный в среде разработки.

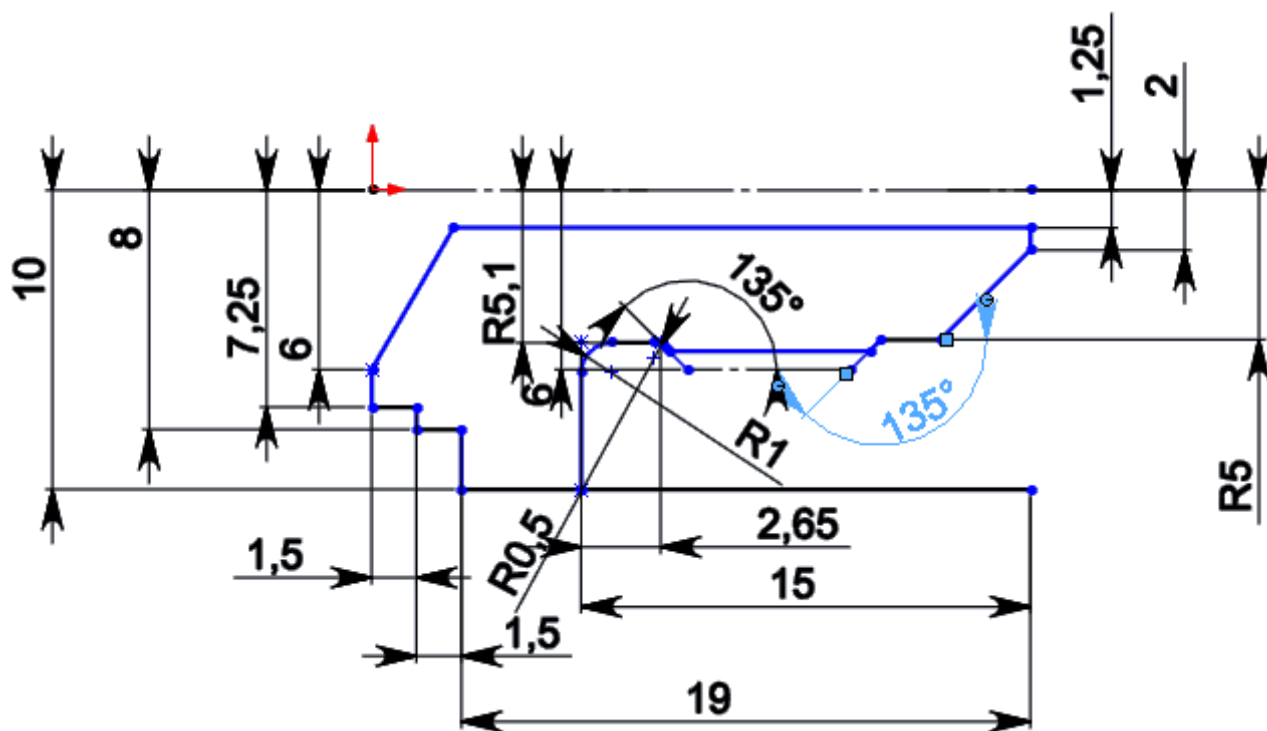


Рисунок 2.2.1 – 2D эскиз основной части измерительного датчика

Указанный эскиз был использован для применения инструмента вращения. В качестве оси была выбрана его длинная сторона. На рисунке 2.1.4 представлен вид итоговой объёмной модели.

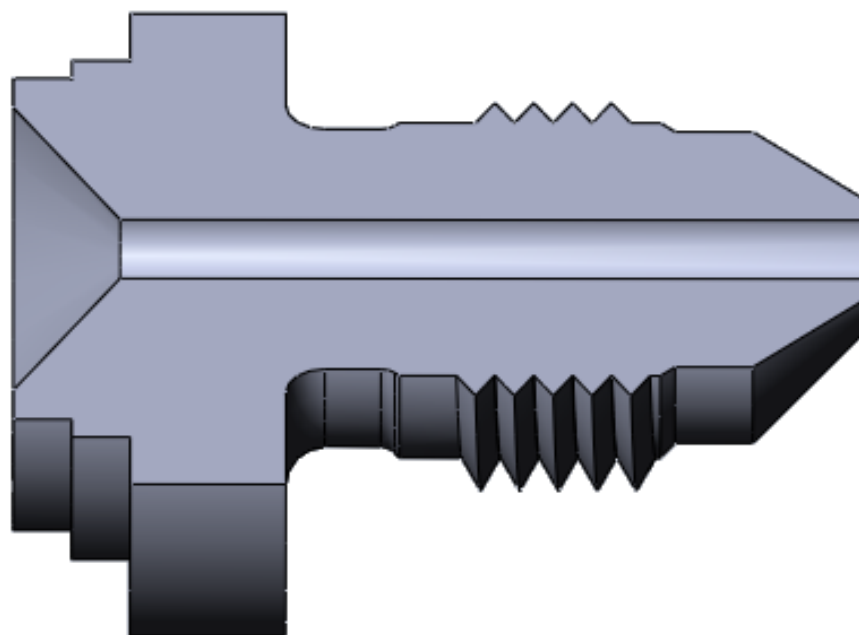


Рисунок 2.2.2 – Объёмная модель основной части измерительного датчика

Все остальные части были построены по данному алгоритму, кроме тонкой пластинки, отвечающей чувствительному элементу типа кремний на сапфире. Этот элемент был получен в результате применения инструмента выдавливания к прямоугольному 2D эскизу.

Полученные вышеуказанным способом элементы конструкции датчика объединяются в сборку, что означает соединение составных частей для образования целостного изделия, отвечающего определенным техническим требованиям. Сборка образуется путем объединения созданных деталей и их позиционирования с помощью наложения зависимостей (совмещение, вставка и т.д.). Среда разработки предлагает широкий диапазон возможностей наложения зависимостей на элементы сборки для достижения нужного расположения всех частей в итоговой конструкции.

В результате применения вышеуказанных инструментов зависимостей была получена модель датчика давления, которая представлена на рисунке 2.1.5. Готовая геометрическая модель была экспортирована в специальный формат STEP для дальнейшей работы в среде пакета Solid Works.

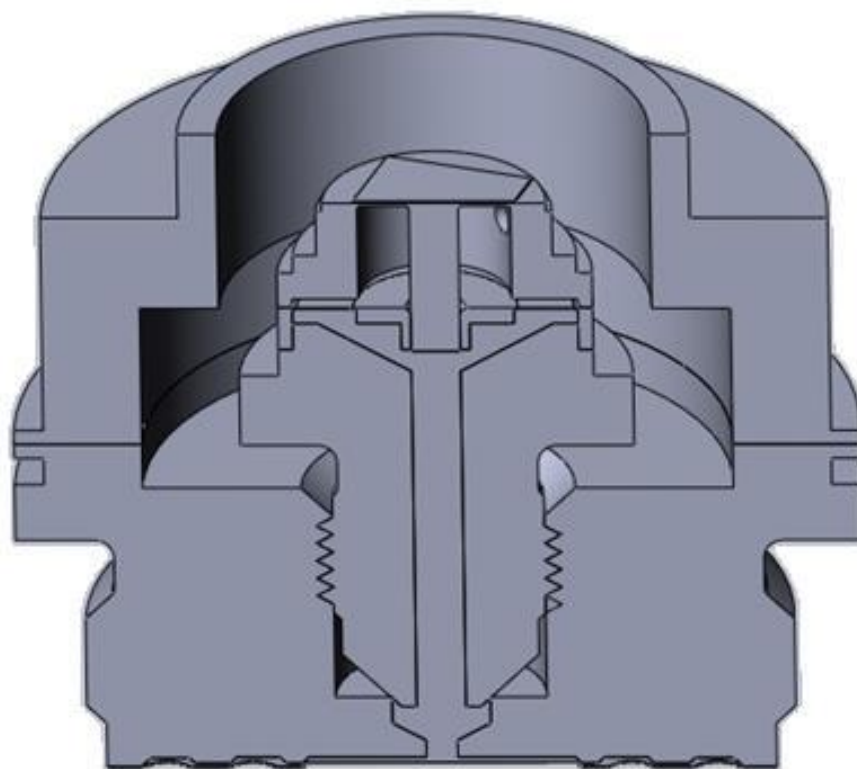


Рисунок 2.2.3 – Модель датчика давления в сборе

2.3 Задание свойств материалов

На данном шаге выбираются материалы конструктивных элементов датчика и указываются все его необходимые свойства. Задание свойств определяет модель материала, что влияет на выбор определяющих уравнений метода конечных элементов. Для проведения расчетов необходимы следующие характеристики материалов:

- плотность ρ ;
- коэффициент Пуассона μ ;
- модуль упругости (модуль Юнга) E_m .

Рассмотрим каждый материал в отдельности (рисунок 2.1.6).

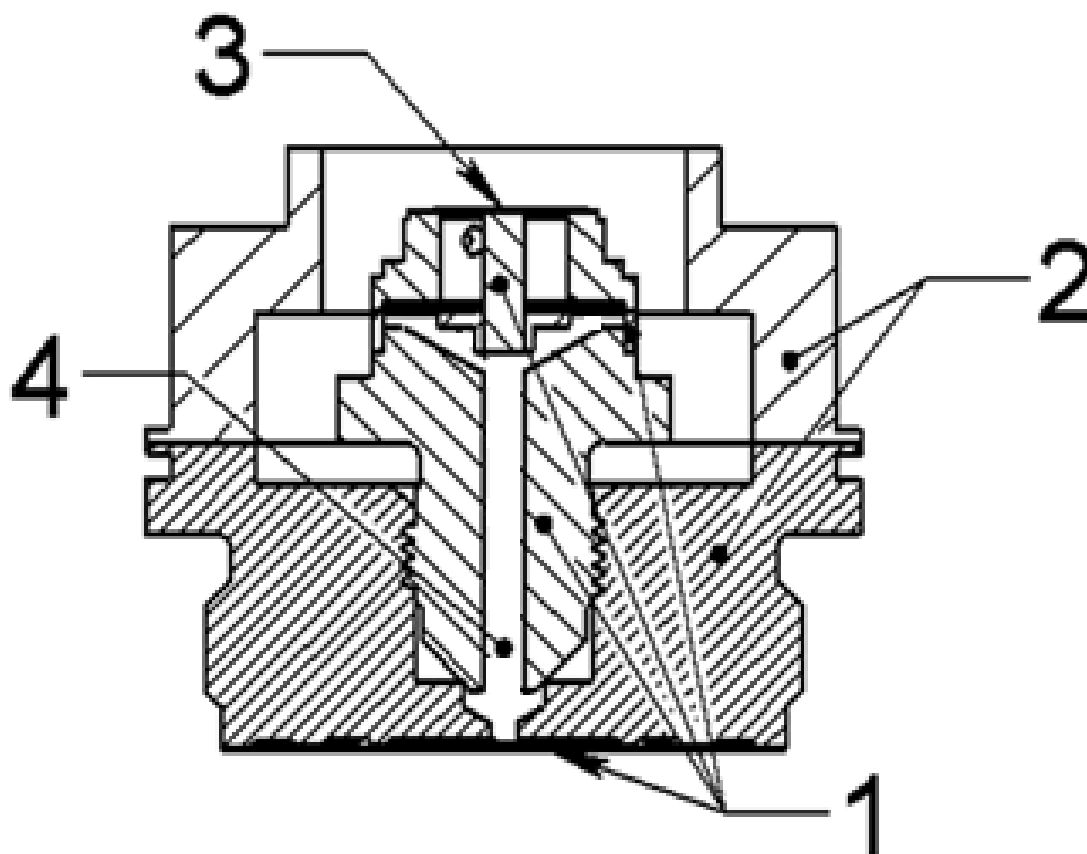


Рисунок 2.3.1 – Материалы модели

В расчете использовались справочные механические характеристики материалов. Измерительный датчик (1) – титановый деформируемый с высокой

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

коррозионной стойкостью сплав ВТ9 с характеристиками $\rho = 4510 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,3$; $E_m = 96 \text{ ГПа}$.

Корпус датчика (2) – сталь коррозионностойкой жаропрочной марки 12Х18Н9Т с характеристиками: $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,3$; $E_m = 93 \text{ ГПа}$.

Чувствительный элемент типа «кремний-на-сапфире» (3) выполнен в виде тонкой однородной пластинки. Материалом этой детали принят сапфир (Al_2O_3) с характеристиками: $\rho = 3980 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,27$; $E_m = 426 \text{ ГПа}$.

Все вышеуказанные материалы известны и хорошо описаны в справочной литературе. Также были приняты следующие характеристики полиметилсилоксановой жидкости ПМС-6 (4), заполняющей измерительный датчик: $\rho = 950 \text{ кг/м}^3$; динамическая вязкость $\eta = 0,005 \text{ Па}\cdot\text{с}$; скорость звука $c = 1350 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$.

2.4 Задание контактных условий

Следующий шаг в построении модели представляет собой создание контактных условий для элементов сборки, определяется модель контакта и ее характеристики. В геометрической модели в качестве контактов служат сварные швы, резьбовое соединение, контакт между чувствительным элементом и мембраной и между жидкостью и измерительной частью датчика.

Все сварные соединения в модели выполнены с помощью инструмента точечной сварки SpotWeld и показаны на рисунке 2.1.7.

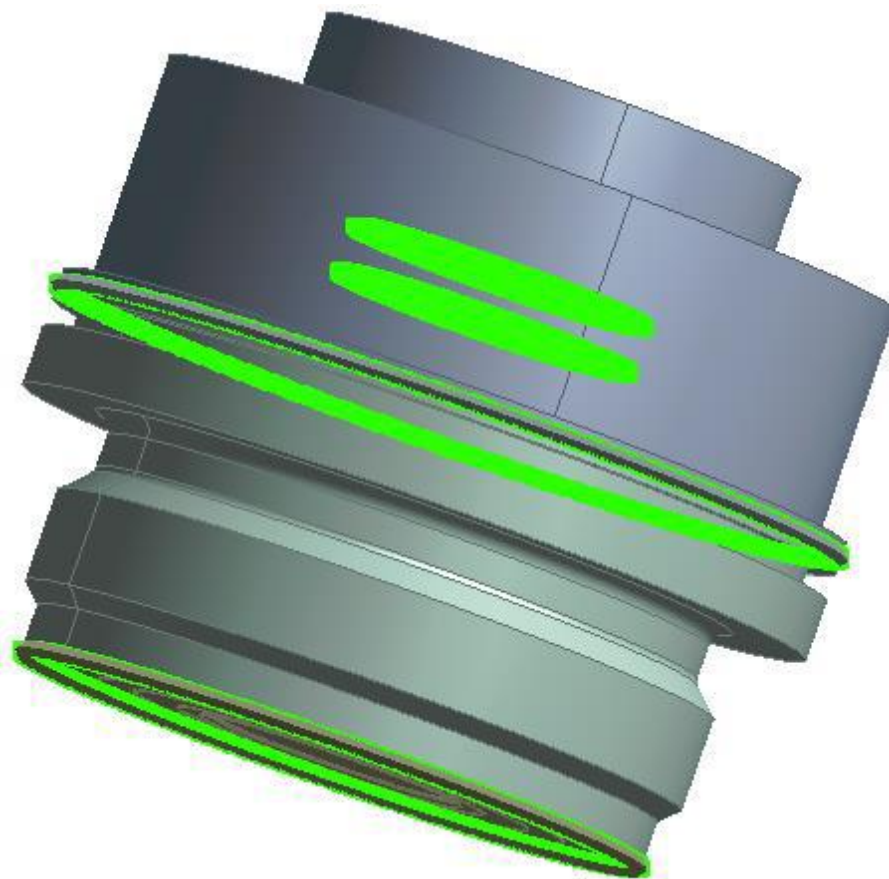


Рисунок 2.4.1 – Сварные соединения на модели датчика

Для создания геометрии резьбового соединения «корпус – основа измерительной части датчика» был использован пакет программ SolidWorks, и она была прорисована еще на этапе создания эскиза. В ANSYS задаются контактные поверхности и тип контакта – «bonded» (связанный, склеенный) (рисунок 2.1.8).

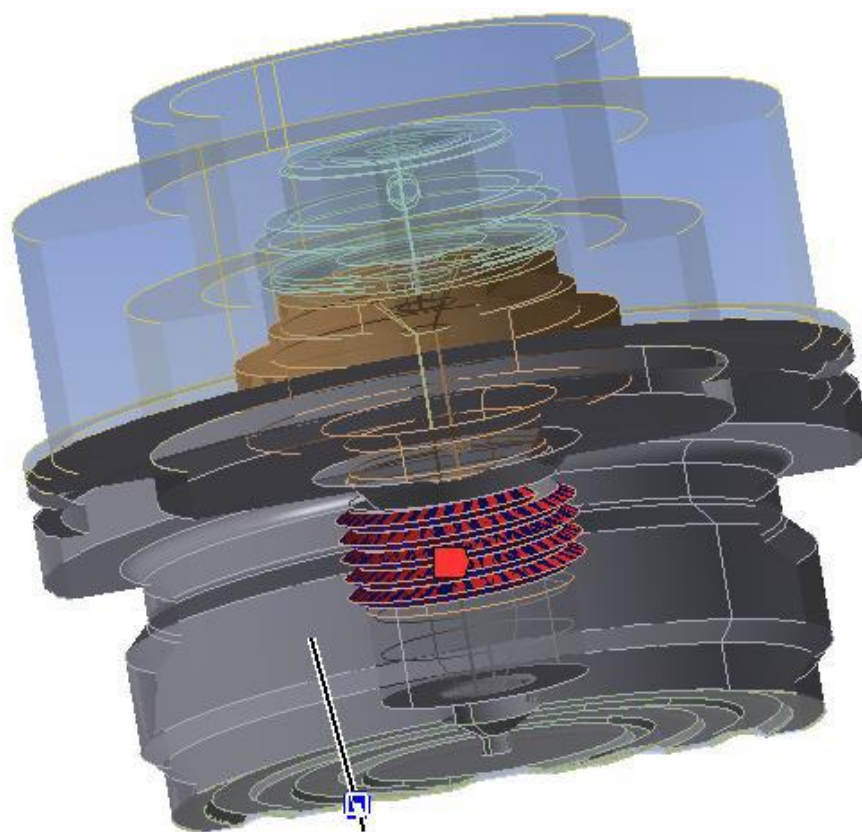


Рисунок 2.4.2 – Резьбовое соединение на модели датчика

Контакты между чувствительным элементом и мембраной и между жидкостью и измерительной частью датчика выполнены типом «bonded» (рисунок 2.1.9).

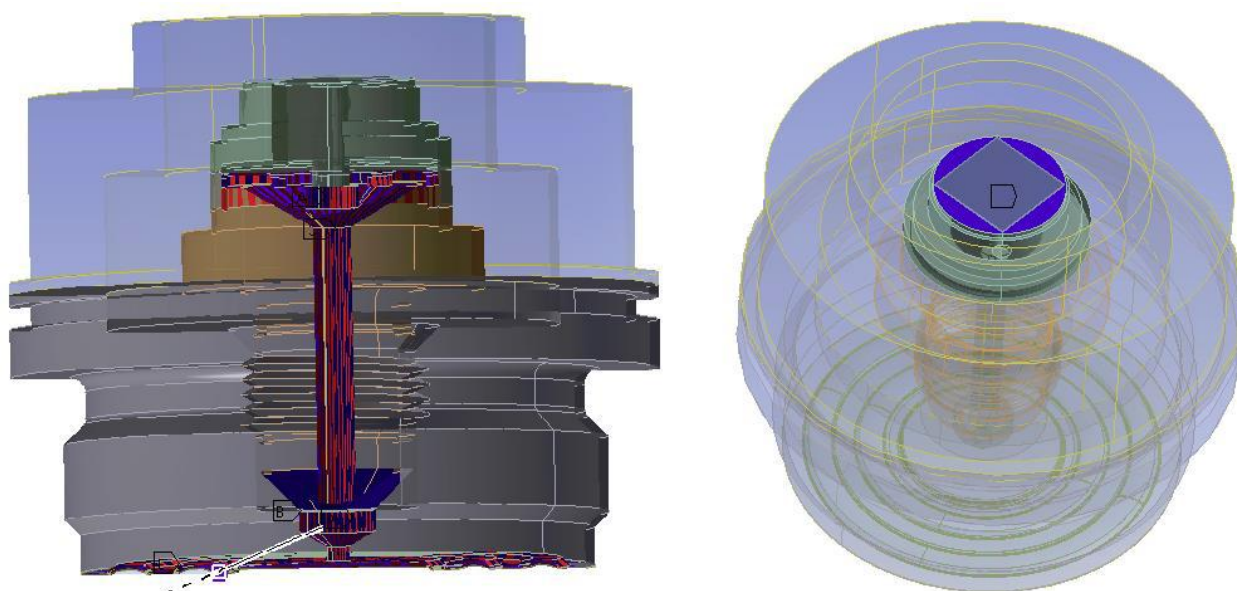


Рисунок 2.4.3 – Контакты между жидкостью и измерительной частью датчика

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

2.5 Оценка частот собственных колебаний конструкции преобразователя

Модель рассчитывается в симметричной постановке, поэтому необходимо наложить такое закрепление на плоскость симметрии, которое бы запрещало перемещение ее точек по нормали и вращение вокруг осей, отличных от нормали. В лабораторном эксперименте по определению собственных частот датчик был закреплен в специальном устройстве по внешней грани. Отображением этого в модели будет служить фиксирование поверхности, как показано на рисунке 3.1.1.

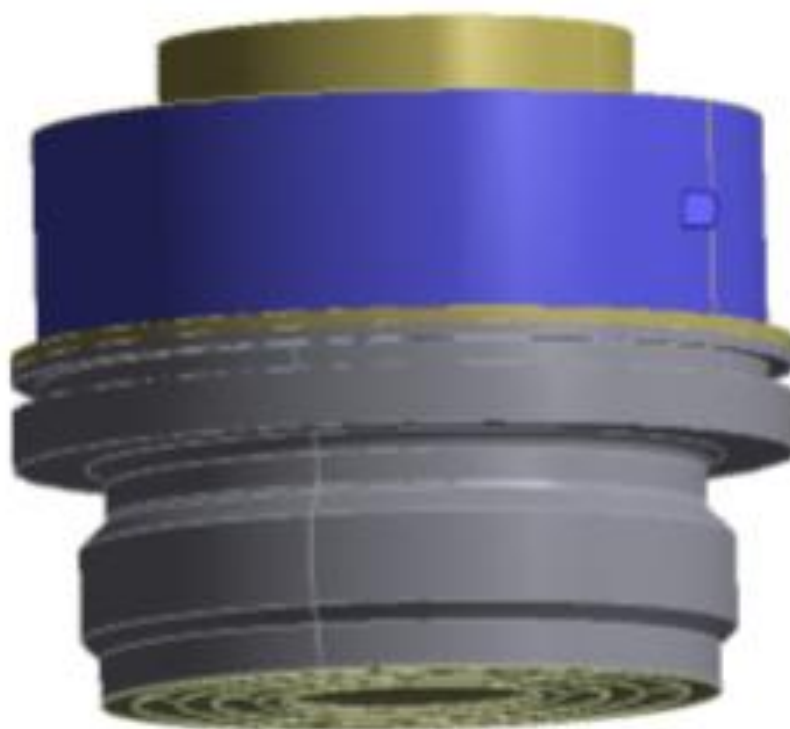


Рисунок 2.5.1 – Задание граничных условий

Далее на основе разработанной модели производятся расчеты. Результатами расчета являются оценки собственных частот и форм колебаний элементов конструкции преобразователя при наличии различных дефектов. Расчеты состоят в решении системы уравнений, полученной методом конечных элементов (МКЭ). В результате решения формируется файл результатов, который содержит вектор найденных степеней свободы (узловых перемещений и т.д.). Рассчитанные МКЭ перемещения, деформации и напряжения представляются в графическом окне в виде картинок и анимаций. Все эти результаты можно записать в

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

соответствующие файлы. Благодаря интерактивному режиму проведения расчетов можно просмотреть в графическом виде формы собственных колебаний конструкции датчика для каждой моды, которой соответствует определенная частота колебаний. По виду перемещений устанавливаем, какие именно конструктивные элементы преобразователя участвуют в конкретном колебании и испытывают наибольшую деформацию. Таким образом разработанная система компьютерного моделирования позволяет получить частоты и формы колебаний, характерных для конкретной конструкции, на основе рассчитанных распределений деформаций и перемещений по времени и по координате. На основе полученных данных устанавливаем, каким значениям частот соответствуют определенные колебания конструктивных элементов. В результате для конструкции преобразователя давления с разделительной мембраной были получены оценки 17 мод колебаний конструкции преобразователя, каждой из которых соответствует определенная частота и форма колебаний (см. таблицу 2.5.1). В таблице для каждой моды дано краткое описание формы колебания, которая представляет собой распределение перемещений точек определенных конструктивных элементов во времени и пространстве. На рис. 2.5.2 представлены частоты без учета относительной амплитуды.

Таблица 2.5.1 – рассчитанные моды колебаний преобразователя давления

Номер моды	Частота, Гц	Краткое описание колебания
1	10785	Колебания измерительной части датчика как консольной балки
2	10904	
3	12956	Колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса
4	13099	
5	13416	
6	17369	Колебание измерительной части относительно центральной оси
7	22707	Колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса
8	22785	
9	25546	Колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса относительно центральной оси
10	35865	Продольные колебания измерительной части датчика
11	41702	Изгибные колебания измерительной части датчика
12	41957	
13	42662	Изгибные колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса
14	42910	
15	58662	Колебания измерительной части датчика
16	58871	
17	59502	Колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса

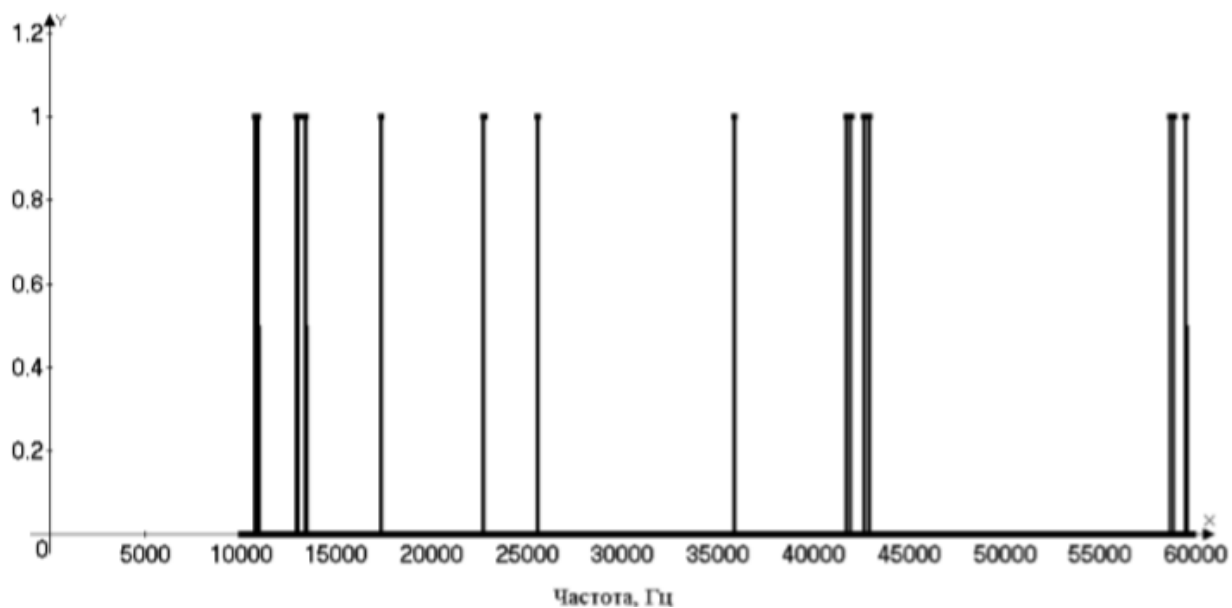


Рисунок 2.5.2 - Значения частот, полученные в результате расчетов

Частоты, соответствующие модам 1 и 2, 4 и 5, 7 и 8, 11 и 12, 13 и 14, 15 и 16 близки друг к другу как по значению частоты, так и по форме колебаний. При исследовании видно, что они, как правило, испытывают одинаковое влияние факторов, поэтому в дальнейшем можно говорить о них, как об одной «двойной» частоте. На рисунке 3.1.2 представлены некоторые характерные формы колебаний конструкции преобразователя. По виду колебаний можно сделать предварительные предположения относительно влияния нарушений конструкции преобразователя на значения собственных частот. Так, например, частота 10785 Гц, соответствующая 1 моде, зависит от податливости резьбы, связанной с точностью изготовления, величиной затяжки и модулями упругости контактирующих материалов. Снижение этой частоты в эксперименте может рассматриваться как признак ослабления затяжки резьбы, что в свою очередь служит сигналом о перераспределении напряжений в датчике и увеличении погрешности измерений.

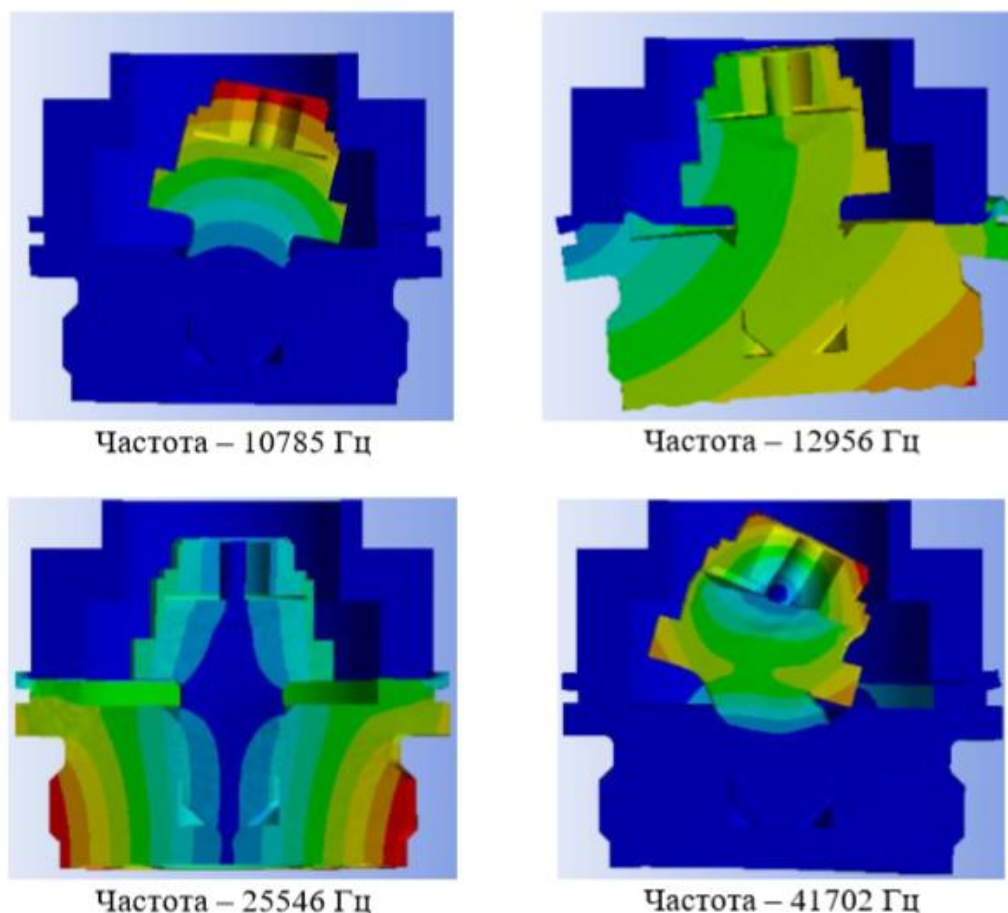


Рисунок 2.5.3 - Формы колебаний, соответствующие модам 1, 3, 9 и 11

Параметры модели, связанные со свойствами материала (плотность, модуль упругости) могут существенно влиять на расчетные оценки собственных частот. Более того, изменения данных свойств могут происходить на практике в результате нагрева или специфических условий эксплуатации приборов. Рассмотрим влияние свойств материалов (в данном случае – значение модуля упругости разделительной и измерительной мембран) на оценки частот.

Для исследования влияния значения модуля упругости на расчетные значения собственных частот были проведены расчеты со следующими значениями модуля упругости разделительной мембраны: 93, 193, 403, 603, 803 и 1003 ГПа. Опорное значение модуля упругости – 193 ГПа. В таблице 2.5.2 приведены расчетные значения собственных частот преобразователя давления.

Таблица 2.5.2 – частоты (Гц), соответствующие колебаниям конструкции, при различных значениях модуля упругости разделительной мембраны

Номер моды	93 ГПа	193 ГПа	403 ГПа	603 ГПа	803 ГПа	1003 ГПа
1	10785	10785	10784	10784	10783	10779
2	10904	10904	10903	10903	10902	10898
3	12958	12956	12954	12953	12952	12945
4	13101	13099	13097	13096	13094	13088
5	13418	13416	13414	13413	13411	13405
6	17369	17369	17369	17369	17369	17369
7	22713	22707	22704	22703	22703	22687
8	22791	22785	22782	22781	22781	22765
9	25556	25546	25542	25540	25540	25537
10	35865	35865	35865	35865	35865	35865
11	41702	41702	41702	41702	41702	41702
12	41957	41957	41957	41957	41957	41957
13	42662	42662	42661	42660	42660	42657
14	42911	42910	42909	42908	42908	42905
15	58662	58662	58662	58662	58662	58662
16	58871	58871	58871	58871	58871	58871
17	59508	59502	59492	59482	59474	59447

При уменьшении или увеличении модуля упругости разделительной мембраны в два раза происходит незначительное изменение (менее 0,1 % для колебаний нижней части корпуса, измерительной системы и мембраны). Наибольшее изменение частот затрагивает моды 7 и 10 и не превышает 0,4% даже при изменении модуля упругости в 8 раз.

Если рассмотреть влияние на собственные частоты изменения модуля упругости измерительной мембраны, то результат окажется несколько иным. В таблице 3.1.3 приведены расчетные значения собственных частот преобразователя при модулях упругости измерительной мембраны 56, 96, 99, 136, 196 и 296 ГПа (опорное значение 96 ГПа).

Таблица 2.5.3 – частоты (Гц), соответствующие колебаниям конструкции, при различных значениях модуля упругости измерительной мембраны

Номер моды	56 ГПа	96 ГПа	99 ГПа	136 ГПа	196 ГПа	296 ГПа
1	10828	10785	10783	10765	10751	10738
2	10949	10904	10902	10883	10868	10855
3	12968	12956	12956	12951	12947	12944
4	13111	13099	13099	13094	13090	13086
5	13428	13416	13416	13411	13407	13403
6	17394	17369	17368	17359	17352	17347
7	22811	22707	22703	22667	22639	22616
8	22886	22785	22781	22746	22718	22696
9	25548	25546	25546	25545	25545	25545
10	35899	35865	35863	35847	35832	35817
11	41741	41702	41700	41681	41664	41646
12	41997	41957	41955	41936	41936	41936
13	43225	42662	42642	42496	42489	42483
14	43495	42910	42889	42757	42628	42526
15	58717	58662	58659	58632	58608	58583
16	58926	58871	58868	58841	58817	58792
17	60872	59502	59444	58935	58477	58064

В данном случае при уменьшении или увеличении модуля упругости измерительной мембраны на 40% наблюдается изменение практически всех частот, причем изменение на некоторых частотах достигает 1%. Наибольшее изменение частот, как и в случае с разделительной мембраной, затрагивает моды 7, 10 и 13, но имеет существенно большее значение – от 0,4 до 2% при увеличении модуля упругости в три раза. Учитывая, что ожидаемое реальное изменение модуля упругости мембраны составляет 0,5%, на практике влиянием модуля упругости на частоты колебаний можно пренебречь.

2.6 Расчет выходного давления

Основным параметром стенда динамических испытаний датчиков давления является выходное давление.

Выходное давление находится по формуле [38]:

$$P_{\text{ВЫХ}_i} = P_{\text{ВЫХ}_{i-1}} + \frac{(P_{\text{В}} - P_{\text{ВЫХ}_{i-1}}) \cdot Q_1 \cdot (T_i - T_{i-1})}{V_{\text{раб.орг.}}} + \frac{(P_{\text{Н}} - P_{\text{ВЫХ}_{i-1}}) \cdot Q_2 \cdot (T_i - T_{i-1})}{V_{\text{раб.орг.}}},$$

где T_i – время работы стенда, которое находится по формуле:

$$T_i = 4 \cdot \frac{\beta_i}{F_{\text{ВЫХ}}},$$

где $F_{\text{ВЫХ}}$ – выходная частота, которая находится по формуле:

$$F_{\text{ВЫХ}} = \frac{4N}{60},$$

где N – частота вращения ротора [об/мин].

Данный стенд динамических испытаний датчиков давления может работать в трех режимах:

- 1) меандр;
- 2) синусоида;
- 3) треугольник.

Для создания режима меандр необходимо уменьшить частоту вращения ротора.

Построим характеристику выходного давления от времени работы для параметров:

$$F_{\text{ВЫХ}} = 3 \text{ Гц};$$

$$P_{\text{В}} = 400 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{Н}} = 0 \text{ кПа};$$

$$Q_{\text{В}} = 200 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Характеристика выходного давления от времени работы в режиме меандр представлена на рисунке 16.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

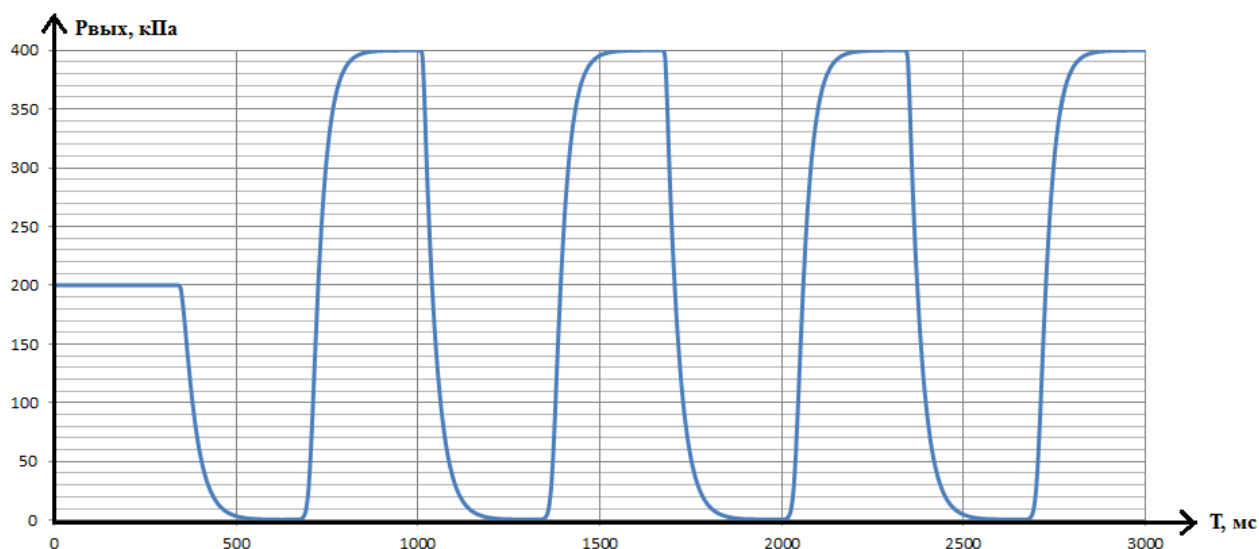


Рисунок 2.6.1 – Характеристика выходного давления от времени работы стенда в режиме меандр

Из характеристики видно, что давление в рабочем резервуаре успевает насытиться до максимума. Поэтому амплитуда колебаний составляет 100% от входного давления. При данной частоте вращения ротора период колебаний составляет 700 мс.

При увеличении $P_{\text{н}}$ до атмосферного давления получим характеристику (Рисунок 17).

Начальные параметры:

$$F_{\text{вых}} = 3 \text{ Гц};$$

$$P_{\text{в}} = 400 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{н}} = 101 \text{ кПа};$$

$$Q_{\text{в}} = 200 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

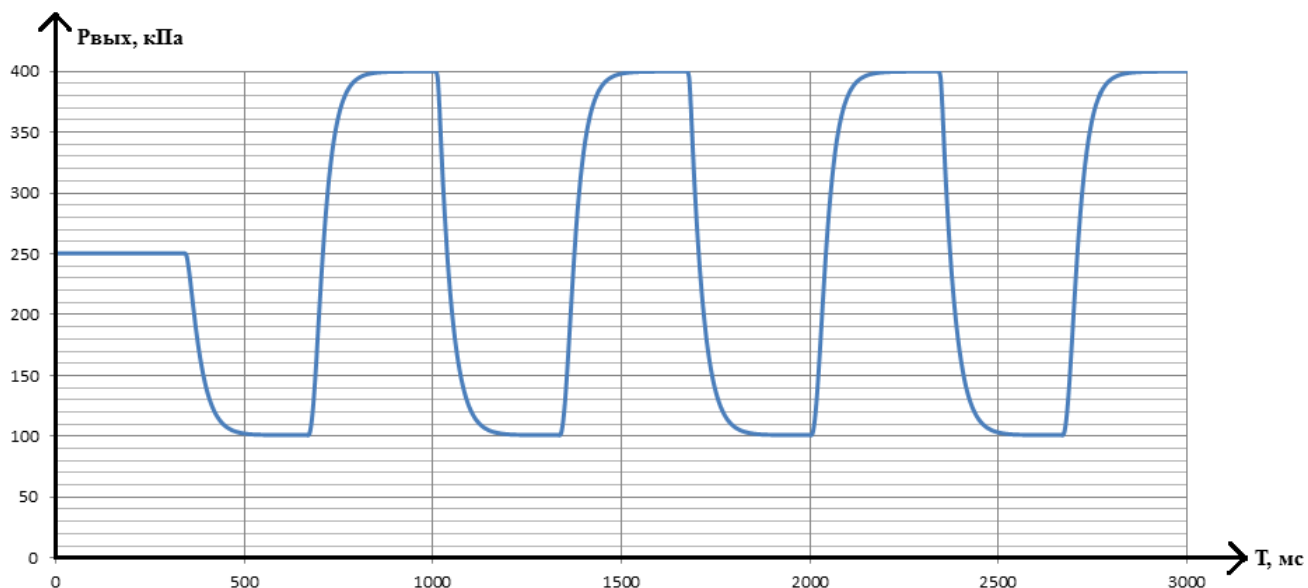


Рисунок 2.6.2 – Характеристика выходного давления от времени работы стенда в режиме меандр

Для создания режима синус необходимо увеличить частоту вращения ротора.

Построим характеристику выходного давления от времени работы для параметров:

$$F_{\text{вых}} = 40 \text{ Гц};$$

$$P_{\text{в}} = 400 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{н}} = 101 \text{ кПа};$$

$$Q_{\text{в}} = 200 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Характеристика выходного давления от времени работы в режиме синусоида представлена на рисунке 18.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

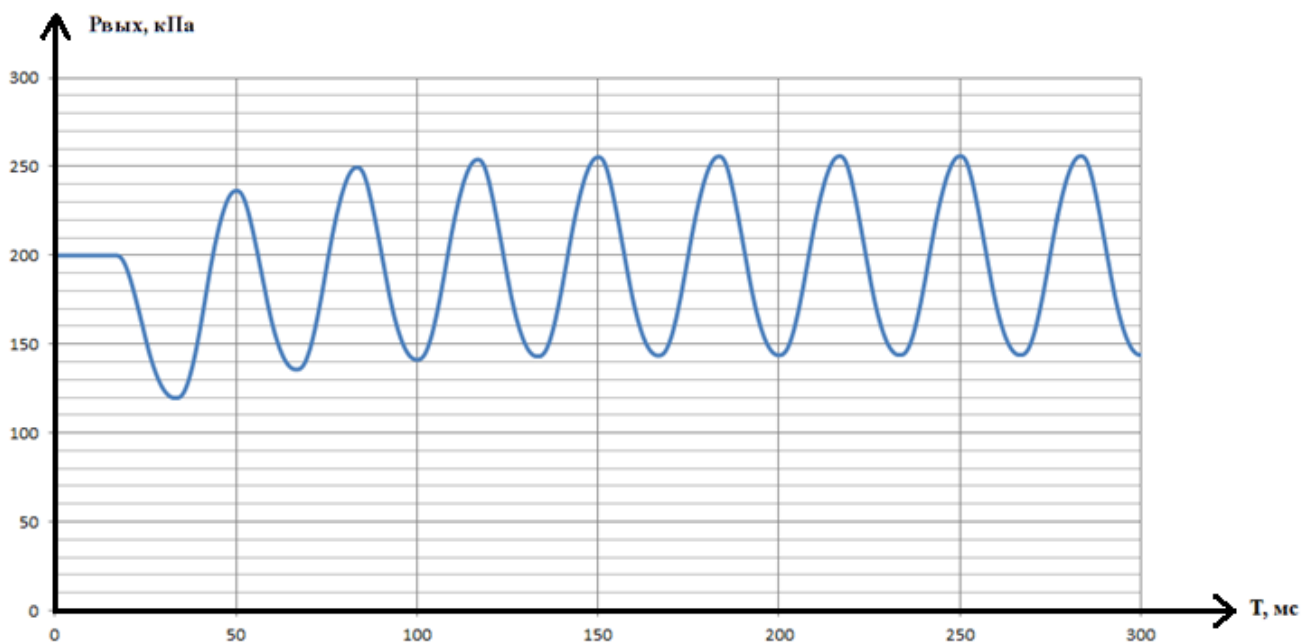


Рисунок 2.6.3 – Характеристика выходного давления от времени работы
стенда в режиме синусоида

Из характеристики видно, что давление в рабочем резервуаре не успевает насытиться до максимума. Поэтому амплитуда колебаний составляет 70% от входного давления. При данной частоте вращения ротора период колебаний составляет 33 мс.

Для создания режима треугольник необходимо уменьшить расход воздуха через регулируемые вентили.

Построим характеристику выходного давления от времени работы для параметров:

$$F_{\text{вых}} = 25 \text{ Гц};$$

$$P_{\text{в}} = 800 \text{ кПа};$$

$$P_{\text{н}} = 101 \text{ кПа};$$

$$Q_{\text{в}} = 20 \frac{\text{л}}{\text{мин}}.$$

Характеристика выходного давления от времени работы в режиме меандр представлена на рисунке 19.

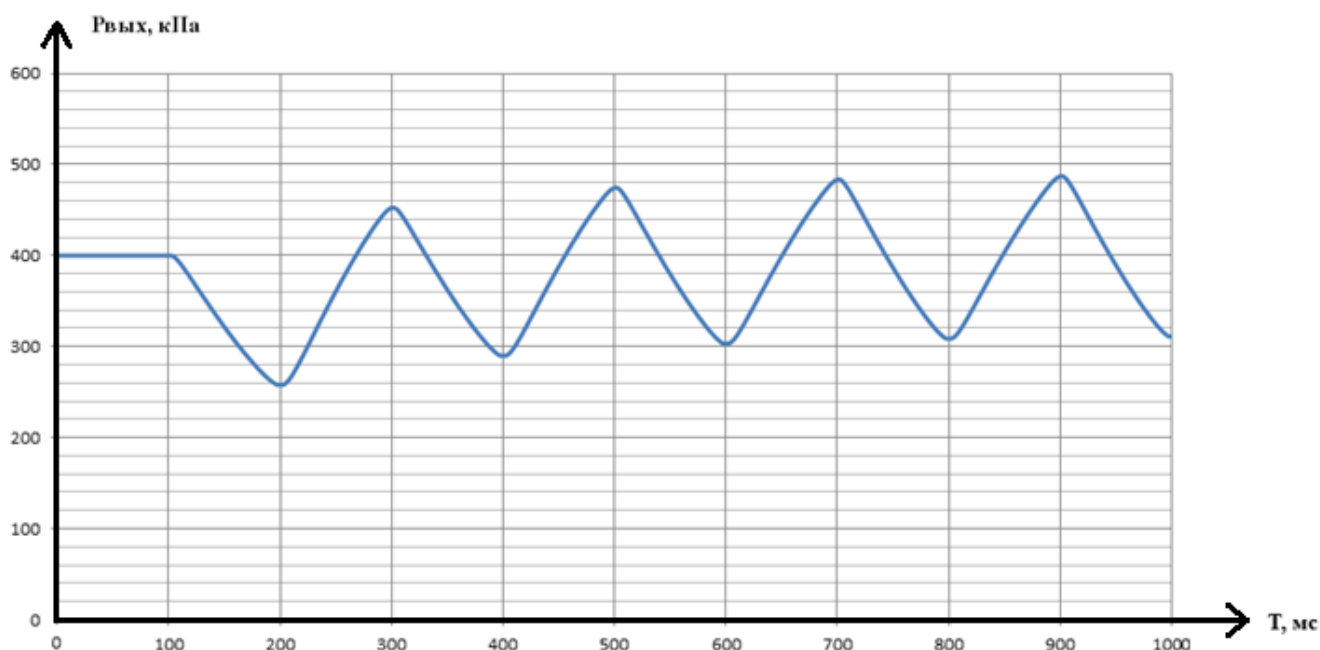


Рисунок 2.6.4 – Характеристика выходного давления от времени работы стенда в режиме треугольник

Из характеристики видно, что давление в рабочем резервуаре не успевает насытиться до максимума. Поэтому амплитуда колебаний составляет 60% от входного давления. При данной частоте вращения ротора период колебаний составляет 200 мс.

При изменении давления в ресиверах минимального и максимального давления, расхода воздуха через вентили, частоту вращения ротора можно достичь необходимо характеристику.

2.7 Построение конечно-элементной модели

Согласно методу конечных элементов, модель датчика, имеющая сложную форму, подразделяется на более мелкие части – конечные элементы – сравнительно простой формы, в пределах которых ищется приближенное решение. В результате разбивки создается сетка из границ элементов. Точки пересечения этих границ образуют узлы. На границах и внутри элементов создаются дополнительные узловые точки. Все конечные элементы и узлы являются основной конечно-элементной моделью датчика.

Состояние датчика характеризуется конечным числом независимых параметров, определенных в узлах сетки. В нашем случае в качестве таких параметров применяются перемещения узлов. На рисунке 2.1.10 показан узел, имеющий три степени свободы, составляющие узловой вектор степеней свободы U_i . Набор всех степеней свободы модели составляет общий (глобальный) вектор степеней свободы U . Распределенные силы, действующие по границам элемента, заменяются эквивалентными узловыми силами, составляющими вектор узловых сил элемента [31].

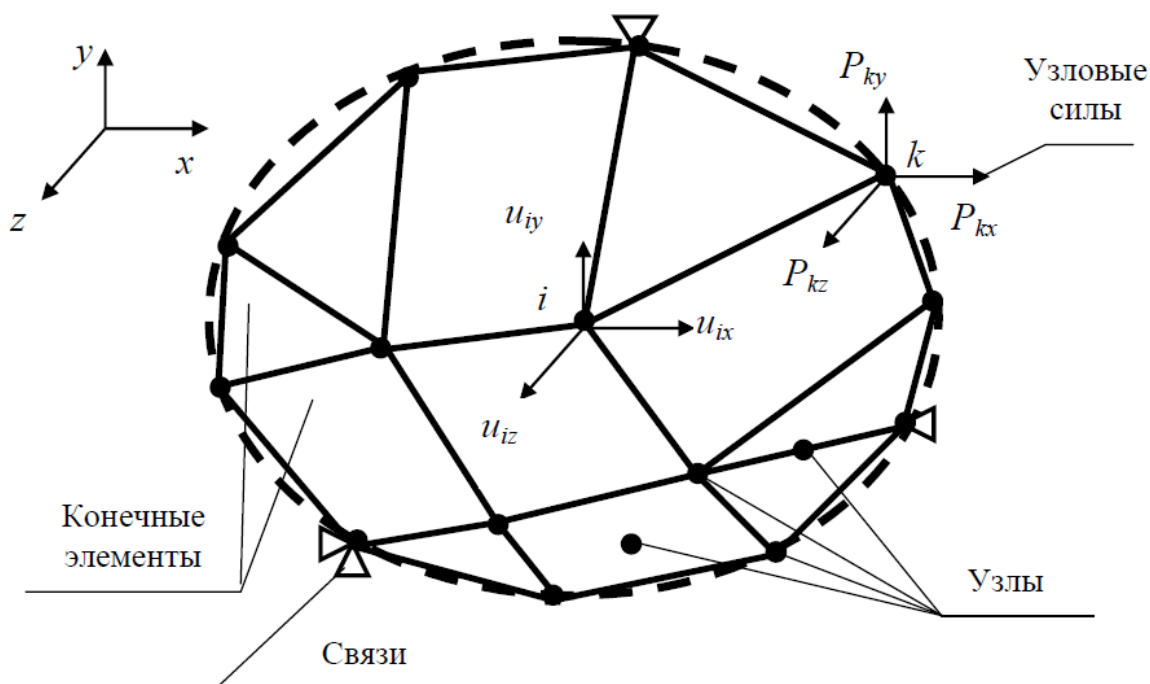


Рисунок 2.7.1 – Разбивка на конечные элементы

Принимается, что конечные элементы взаимодействуют только через общие узлы. Перемещение каждого конечного элемента описывается дифференциальным матричным уравнением

$$[m]_e \frac{d^2}{dt^2} \{U\}_e + [C]_e \frac{d}{dt} \{U\}_e + [K]_e \{U\}_e = \{F\}_e, \quad (2.5.1)$$

где $[m]_e$ – матрица масс элемента, $[C]_e$ – матрица демпфирования элемента, $[K]_e$ – матрица жесткости элемента, состоящая из коэффициентов жесткости, $\{U\}_e$ – вектор узловых перемещений, $\{F\}_e$ – вектор узловых сил элемента.

Из условий равновесия узлов, применяемых ко всей конечно-элементной модели, составляется общая система дифференциальных уравнений движения, в которых внешние силы могут быть переменными:

$$[m] \frac{d^2}{dt^2} \{U\} + [C] \frac{d}{dt} \{U\} + [K] \{U\} = \{P(t)\} \quad (2.5.2)$$

Общие векторы узловых сил $\{P\}$ и общие матрицы масс $[m]$ и демпфирования $[C]$ собираются из компонентов соответствующих элементных матриц. В случае, когда проводится модальный анализ, то есть определяются собственные частоты и формы колебаний конструкции, вектор узловых сил и матрица демпфирования полагаются равными нулю. Дифференциальные уравнения движения интегрируются численными методами, в результате находят узловые перемещения как функции времени. Через них определяются все другие искомые величины – частоты колебаний, деформации и др.

Главная и основная сложность моделирования датчика давления с разделительной мембраной – моделирование перетекания кремнийорганической жидкости внутри канала. При применении конечно-элементного анализа происходит разбиение всего объёма деталей на элементы сетки. В результате такого разбиения узлы элементов сетки детали, отвечающей жидкости, занимают строго определённое положение относительно элементов остальной конструкции и не поддаются перемещению.

В реальности же происходит перетекание жидкости внутри канала, что означает смещение точек её объёма относительно точек стенок конструкции. Моделирование подобного физического процесса является сложной инженерной задачей, требующей применения связного расчета и большого количества вычислительного времени. В итоге для формализации объекта моделирования в данном исследовании были принято следующее допущение: амплитуды колебаний полагаются малыми, поэтому можно пренебречь нелинейными эффектами деформирования конструкции, что позволяет при описании жидкости

исключить возможность ее перетекания и сохранить лишь деформации, связанные со сжимаемостью.

В данной модели в качестве конечных элементов применялись 10-узловые тетраэдры с параболическими гранями (рисунок 2.1.11). Размер элементов подбирался путем построения последовательности решений с уменьшающимися размерами так, чтобы результаты расчетов содержали как минимум 3 стабильные (не зависящие от размера элементов) значащие цифры.

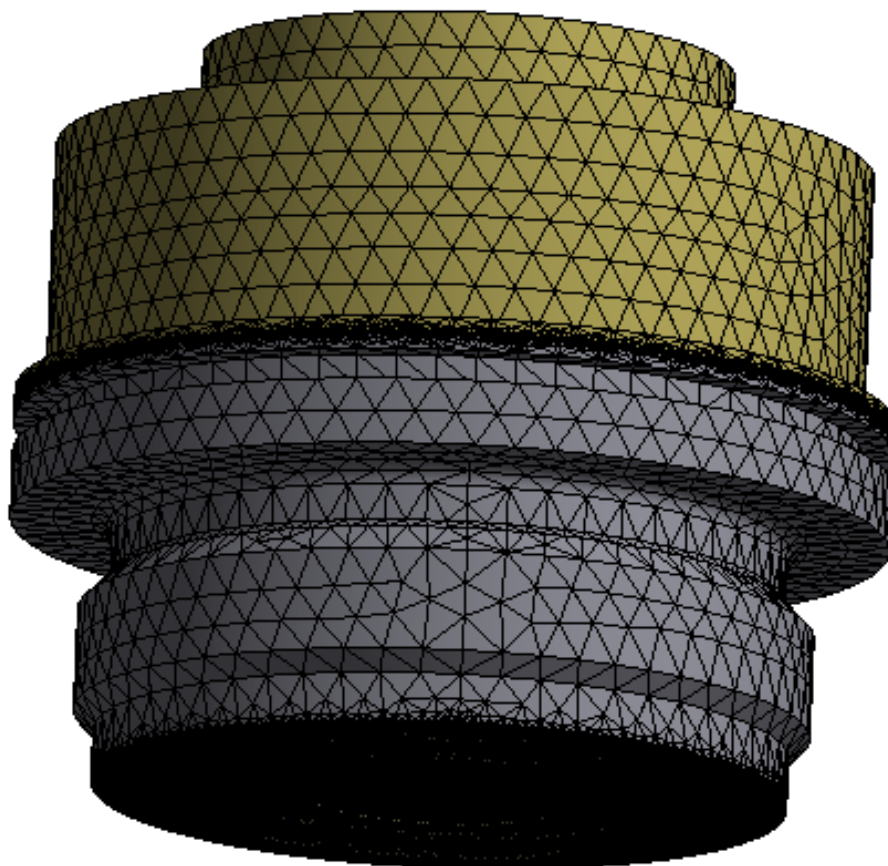


Рисунок 2.7.2 – Сетка конечных элементов датчика давления

Для того, чтобы осуществить расчеты сложной конструкции датчика давления необходимо применять специальные программные пакеты, в частности в данном исследовании в качестве инструмента для моделирования был использован пакет программ Solid Works. С помощью Simulation реализуется интерактивный режим проведения расчетов, основанный на применении командных меню и окон. Каждая вводимая через меню команда сразу же выполняется, а ее результат выводится в соответствующее окно.

При выполнении вышеуказанных этапов решения задачи в памяти компьютера создается база данных, содержащая полную информацию о модели. Эту базу сохраняют в бинарном файле и используют для продолжения анализа. Стоит отметить, что описанная методика моделирования обладает достаточной степенью общности, так как применима не только для конкретного типа конструкции, но также для других типов конструкции датчиков давления и других измерительных устройств, динамические характеристики которых оказывают влияние на их функционирование и могут быть измерены на практике.

Проведенное компьютерное моделирование показало целесообразность моделирования конструкции преобразователя и оценки его амплитудно-частотной характеристики методом конечных элементов. Разработанная система компьютерного моделирования, основанная на применении современных технологий, в частности программного пакета Solid works, позволяет в интерактивном режиме исследовать амплитудно-частотные характеристики преобразователей. Представленная система применима и в различных областях – в приборостроении, автомобилестроении, строительстве, при эксплуатации зданий и сооружений, для исследования метрологических и прочностных характеристик датчиков физических величин, а также для анализа влияния неисправностей в приборах, дефекты которых имеют влияние на их частотные характеристики (пьезодатчики, дифференциальные преобразователи, расходомеры и др.). Компьютерное моделирование влияния дефектов конструкции преобразователя на значения собственных частот позволило получить количественные оценки ожидаемого изменения значений частот вследствие различных дефектов. Установлено, что изменение толщины разделительной мембраны преобразователя не приводит к заметному изменению частоты колебаний, поскольку максимальное изменение частоты при уменьшении толщины мембраны в два раза составляет не более 0,75%.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		70

Выводы по разделу 2:

В ходе написания второго раздела диссертации была разработана модель первичного измерительного преобразователя (ПИП) датчика давления в среде Solid Works. Были заданы свойства материалов. Построена конечно-элементная модель.

В третьей главе при помощи расширения Simulation необходимо найти характеристики разработанной математической модели, а именно зависимость амплитуды колебаний от частоты подаваемого напряжения.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

3 НАХОЖДЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

После создания конечно-элементной модели преобразователя давления накладываются граничные условия и проводятся расчеты необходимых параметров. Для решения задач данного исследования использовался набор инструментов Simulation, предназначенный для анализа свободных механических колебаний с целью определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Расчет свободных колебаний проводится без учета динамических нагрузок, и, как правило, является первым и обязательным шагом при решении более сложных динамических задач.

3.1 Компьютерное моделирование дефектов конструкции преобразователя давления и исследование их влияния на частоты преобразователя

После создания конечно-элементной модели преобразователя давления накладываются граничные условия и проводятся расчеты необходимых параметров. Для решения задач данного исследования использовался набор инструментов Modal analysis, предназначенный для анализа свободных механических колебаний с целью определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Расчет свободных колебаний проводится без учета динамических нагрузок, и, как правило, является первым и обязательным шагом при решении более сложных динамических задач.

Модель рассчитывается в симметричной постановке, поэтому необходимо наложить такое закрепление на плоскость симметрии, которое бы запрещало перемещение ее точек по нормали и вращение вокруг осей, отличных от нормали. В лабораторном эксперименте по определению собственных частот датчик был закреплен в специальном устройстве по внешней грани. Отображением этого в модели будет служить фиксирование поверхности, как показано на рисунке 3.2.1.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

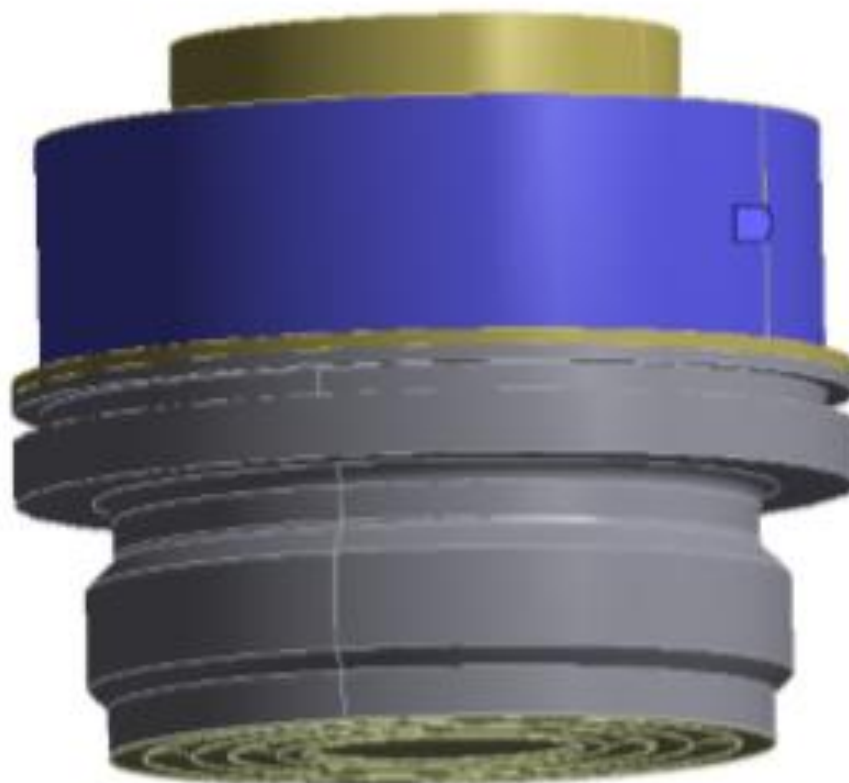


Рисунок 3.2.1 – Задание граничных условий

Далее на основе разработанной модели производятся расчеты. Результатами расчета являются оценки собственных частот и форм колебаний элементов конструкции преобразователя при наличии различных дефектов. Расчеты состоят в решении системы уравнений, полученной методом конечных элементов (МКЭ). В результате решения формируется файл результатов, который содержит вектор найденных степеней свободы (узловых перемещений и т.д.). Рассчитанные МКЭ перемещения, деформации и напряжения представляются в графическом окне в виде картинок и анимаций. Все эти результаты можно записать в соответствующие файлы. Благодаря интерактивному режиму проведения расчетов можно просмотреть в графическом виде формы собственных колебаний конструкции датчика для каждой моды, которой соответствует определенная частота колебаний. По виду перемещений устанавливаем, какие именно конструктивные элементы преобразователя участвуют в конкретном колебании и испытывают наибольшую деформацию. Таким образом разработанная система

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

компьютерного моделирования позволяет получить частоты и формы колебаний, характерных для конкретной конструкции, на основе рассчитанных распределений деформаций и перемещений по времени и по координате. На основе полученных данных устанавливаем, каким значениям частот соответствуют определенные колебания конструктивных элементов. В результате для конструкции преобразователя давления с разделительной мембраной были получены оценки 17 мод колебаний конструкции преобразователя, каждой из которых соответствует определенная частота и форма колебаний (см. таблицу 2.2.1). В таблице для каждой моды дано краткое описание формы колебания, которая представляет собой распределение перемещений точек определенных конструктивных элементов во времени и пространстве. На рис. 2.2.2 представлены частоты без учета относительной амплитуды.

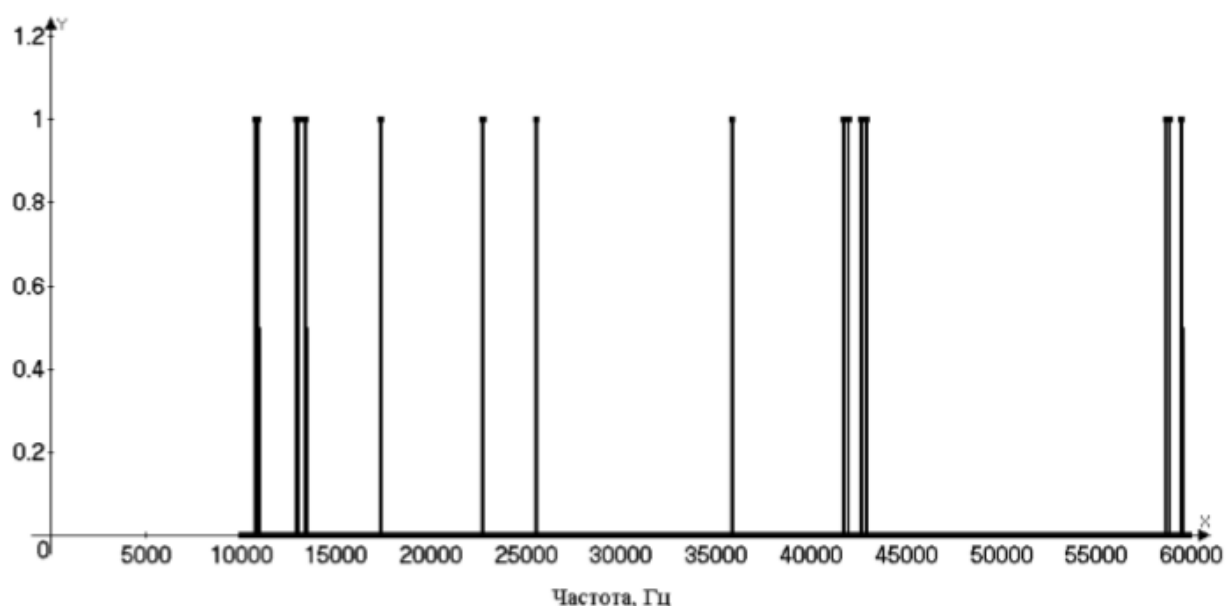


Рисунок 3.2.2 - Значения частот, полученные в результате расчетов

Частоты, соответствующие модам 1 и 2, 4 и 5, 7 и 8, 11 и 12, 13 и 14, 15 и 16 близки друг к другу как по значению частоты, так и по форме колебаний. При исследовании видно, что они, как правило, испытывают одинаковое влияние факторов, поэтому в дальнейшем можно говорить о них, как об одной «двойной» частоте. На рисунке 2.2.2 представлены некоторые характерные формы колебаний

конструкции преобразователя. По виду колебаний можно сделать предварительные предположения относительно влияния нарушений конструкции преобразователя на значения собственных частот. Так, например, частота 10785 Гц, соответствующая 1 моде, зависит от податливости резьбы, связанной с точностью изготовления, величиной затяжки и модулями упругости контактирующих материалов. Снижение этой частоты в эксперименте может рассматриваться как признак ослабления затяжки резьбы, что в свою очередь служит сигналом о перераспределении напряжений в датчике и увеличении погрешности измерений.

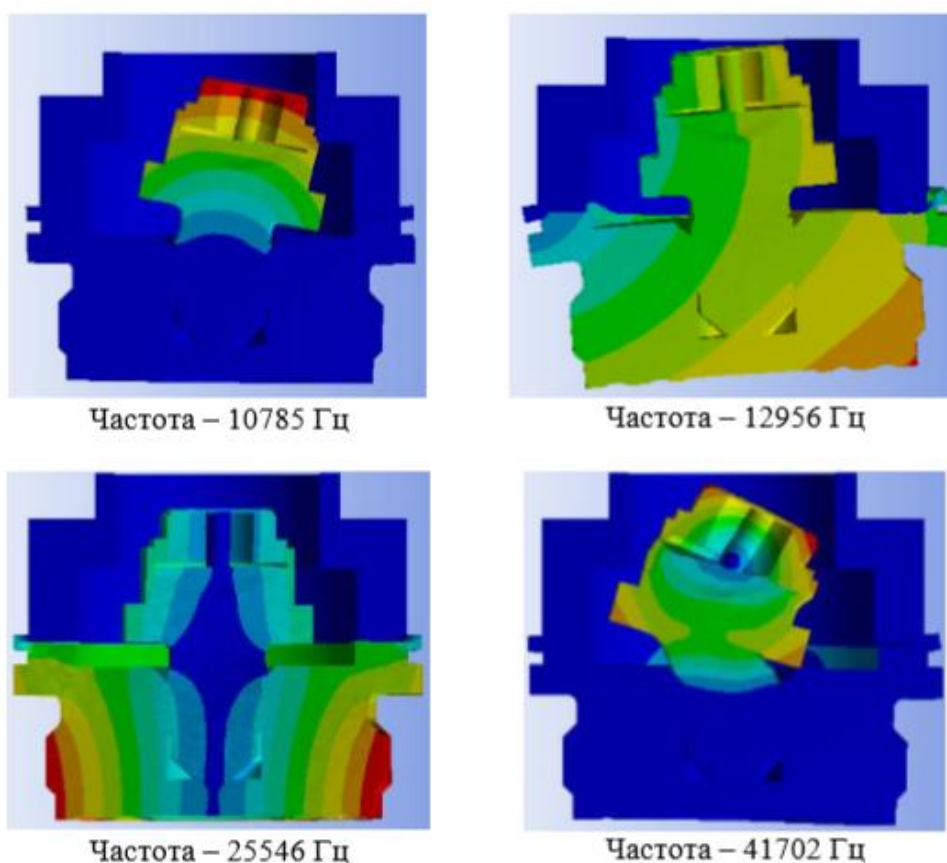


Рисунок 3.2.2 - Формы колебаний, соответствующие модам 1, 3, 9 и 11

Параметры модели, связанные со свойствами материала (плотность, модуль упругости) могут существенно влиять на расчетные оценки собственных частот. Более того, изменения данных свойств могут происходить на практике в результате нагрева или специфических условий эксплуатации приборов.

Рассмотрим влияние свойств материалов (в данном случае – значение модуля упругости разделительной и измерительной мембран) на оценки частот.

Для исследования влияния значения модуля упругости на расчетные значения собственных частот были проведены расчеты со следующими значениями модуля упругости разделительной мембраны: 93, 193, 403, 603, 803 и 1003 ГПа. Опорное значение модуля упругости – 193 ГПа. В таблице 3.2.2 приведены расчетные значения собственных частот преобразователя давления.

При уменьшении или увеличении модуля упругости разделительной мембраны в два раза происходит незначительное изменение (менее 0,1 % для колебаний нижней части корпуса, измерительной системы и мембраны). Наибольшее изменение частот затрагивает моды 7 и 10 и не превышает 0,4% даже при изменении модуля упругости в 8 раз.

Если рассмотреть влияние на собственные частоты изменения модуля упругости измерительной мембраны, то результат окажется несколько иным. В таблице 3.2.3 приведены расчетные значения собственных частот преобразователя при модулях упругости измерительной мембраны 56, 96, 99, 136, 196 и 296 ГПа (опорное значение 96 ГПа).

В данном случае при уменьшении или увеличении модуля упругости измерительной мембраны на 40% наблюдается изменение практически всех частот, причем изменение на некоторых частотах достигает 1%. Наибольшее изменение частот, как и в случае с разделительной мембраной, затрагивает моды 7, 10 и 13, но имеет существенно большее значение – от 0,4 до 2% при увеличении модуля упругости в три раза. Учитывая, что ожидаемое реальное изменение модуля упругости мембраны составляет 0,5%, на практике влиянием модуля упругости на частоты колебаний можно пренебречь.

3.2 Моделирование налипания на разделительную мембрану инородного тела

Моделируемая ситуация соответствует реальному налипанию инородных тел на разделительную мембрану. Данная ситуация может быть воспроизведена в лабораторных условиях для экспериментальной проверки результатов моделирования. Моделирование налипания инородного тела производилось с помощью добавления компонента в конструкцию датчика. Влияние тонкого слоя (с плотностью 1200 кг/м³, рис. 3.3.1, а) на значения собственных частот незначительно, что вызвано малыми размерами и массой слоя. Максимальное изменение частоты (13 Гц) происходит на 17 моде, которая соответствует совместному колебанию измерительной системы, жидкости и нижней части корпуса.



Рисунок 3.2.1 - Конструкция преобразователя с дополнительным слоем (а) и с дополнительным телом шарообразной формы (б) на разделительной мембране

Также моделировалось налипание инородного тела шарообразной формы на разделительную мембрану (см. рис. 3.3.1, б). На поверхность разделительной мембраны налипал шарик диаметром 8 мм, 6 мм и 4 мм и массой, соответственно 0,04 г; 0,136 г; 0,32 г. Масса разделительной мембраны в расчетах полагалась 0,65 г. При налипании тела шарообразной формы меняется количество собственных частот, что вызвано собственными колебаниями достаточно массивного тела шарообразной формы. Колебания, происходящие в новой конструкции, можно

разделить на три группы: колебания, которые не затрагивают прикрепленный шар (масса шара мало влияет на колебание); колебания, в которых участвует прикрепленный шар (масса и размер шара имеют значение); колебания прикрепленного шара (масса и размер шара имеют решающее значение).

К первой группе, например, относятся колебания измерительной системы как консольной балки или относительно центральной оси (моды 1, 2 и 6). Частоты этих колебаний меняются в зависимости от массы тела на значение от 30 до 40 Гц. При этом само появление тела на разделительной мембране влияет на значение частоты более существенно ($f=30$), чем его масса ($m=5$).

Ко второй группе относится большинство рассчитанных колебаний. Например, частоты, соответствующие совместным колебаниям измерительной системы и нижней части корпуса преобразователя (моды 3, 4 и 5), изменяются за счет добавления дополнительного тела, колебания которого участвуют в общем колебании системы. В данном случае размеры и масса груза имеют значение.

Данные частоты также представлены на рисунке 3.2.2. Интересно отметить, что добавление груза к разделительной мембране по-разному влияет на «двойные частоты», изменение которых может существенно отличаться друг от друга.

Таблица 3.2.1 – частоты (Гц) колебаний, в которых принимает участие шарообразное тело, до и после присоединения

Номер моды в однородном случае	Опорная конструкция	Конструкция с соединительным шаром диаметра 8 мм	Абс. разность значений, Гц	Отн. разность значений, %
	Частота, Гц	Частота, Гц		
3	12956	13114	158	1,23
4	13099	13259	160	1,23
5	13416	14687	1271	9,48
7	22707	22781	74	0,33
8	22785	23695	910	4

9	25546	25664	118	0,46
13	42662	42728	66	0,16
14	42910	43009	100	0,23
17	59502	63029	3527	5,93

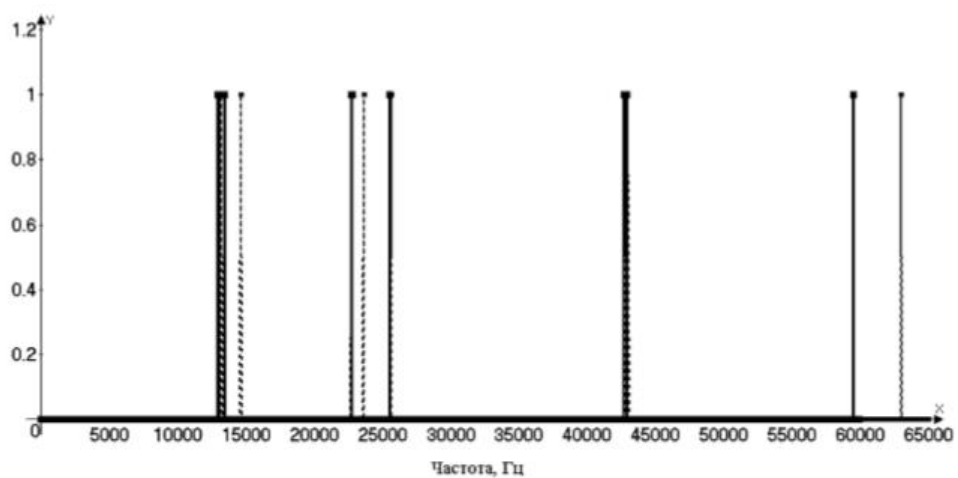


Рисунок 3.2.2 - Расчетные значения частот преобразователя без (сплошная линия) и с присоединенным телом шарообразной формы (штриховая линия)

Третьей группой колебаний являются колебания самого прикрепленного тела. Для шарика диаметром 4 мм такие колебания имеют частоты 45905 Гц и 46349 Гц. Для шарика диаметром 6 мм – 25653 Гц, 25753 Гц, 27577 Гц, 27665 Гц и 43744 Гц. Для шарика диаметром 8 мм – 21946 Гц, 22092 Гц, 27125 Гц, 41426 Гц, 52974 Гц и 53721 Гц.

3.3 Моделирование пластической деформации разделительной мембраны

С течением времени, а также в результате превышения давления, гидроударов, металл подвергается пластической деформации. В ходе моделирования изменялась геометрическая форма мембраны, что соответствует реальным деформациям.

происходящим при эксплуатации преобразователя. С помощью Solid Works и среды Simulation производилось конструирование нового датчика с уже деформированной мембраной. Далее проводился расчет собственных частот для нового датчика. Отличие нормальной и деформированной мембраны показаны на рисунке 3.4.1.



Рисунок 3.3.1 - Нормальная (а) и деформированная (б) разделительная мембрана

Было осуществлено 3 исследования: а) мембрана деформировалась на 0,55 мм по вертикальной оси; б) мембрана деформировалась на 0,33 мм; в) мембрана деформировалась на 0,19 мм. Следует отметить, что практически все частоты, соответствующие колебаниям измерительной системы и корпуса преобразователя, увеличиваются (см. рис. 2.3.4 и табл. 2.3.2). Изменение частоты составляет 2-4% (от 194 Гц до 1803 Гц). Наибольшие относительные изменения наблюдаются на частотах 12956 Гц (мода 3), 13009 Гц (мода 4), 13416 Гц (мода 5), 22707 Гц (мода 7), 22785 Гц (мода 8) и 59502 Гц (мода 17), соответствующих колебаниям измерительной системы и нижней части корпуса, и достигают 3-4%. Колебания, соответствующие модам 1-6, 17 практически не изменяют формы, но частота колебаний увеличивается с ростом деформации мембраны. Форма колебания на моде 9 изменяется в зависимости от деформации, что приводит также к изменению частоты. Двойные колебания на модах 7, 8 и 13, 14 остаются

двойными при деформации 0,55 мм, при меньшей деформации им соответствует одна мода.

Таблица 3.4.1 – частоты (Гц), соответствующие колебаниям измерительной системы и корпуса преобразователя, при различных значениях пластической деформации мембраны

Номер моды	Опорная мембрана	Деформация 0,19 мм	Деформация 0,33 мм	Деформация 0,55 мм
1	10785	10870	10891	10979
2	10904	10999	11031	11143
3	12956	13080	13152	13357
4	13099	13224	13298	13504
5	13416	13564	13633	13832
6	17396	17518	17563	17720
7	22707	22028	22221	23709
8	22785	22028	22221	23786
9	25546	25967	24667	26171
13	42662	42978	43110	43744
14	42910	42978	43110	44170
17	59502	60663	61230	61305

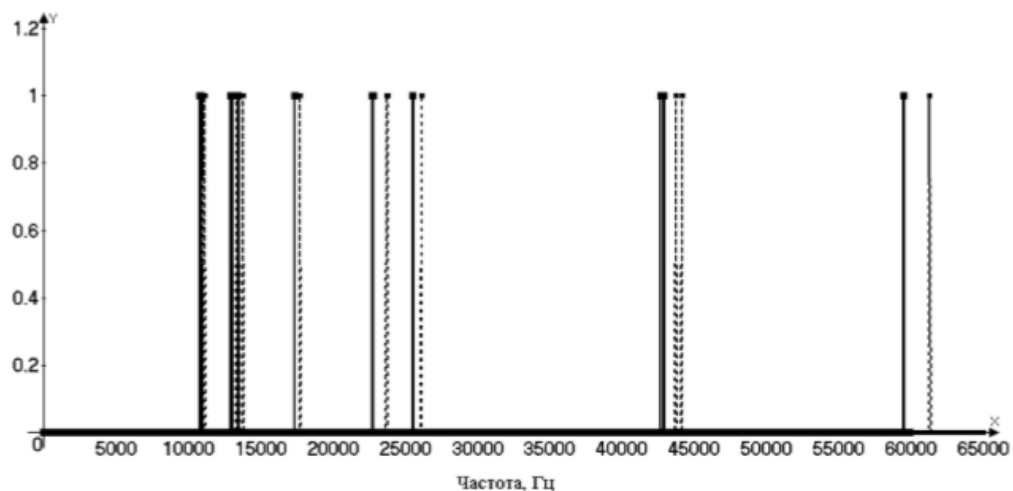


Рисунок 3.4.2 - Частоты преобразователя давления, соответствующие колебаниям измерительной системы и корпуса преобразователя (моды 1-9, 13-14, 17). Сплошная линия – мембрана без деформации, штриховая – деформация мембраны 0,55 мм

Моделирование частичного разрушения сварного шва «разделительная мембрана – корпус»

Частичное или полное разрушение сварного шва «разделительная мембрана – корпус» может привести к вытеканию жидкости из датчика или попаданию внутрь датчика внешней среды. Это приведет к поломке датчика, а также к ухудшению метрологических характеристик, поэтому такие параметры строго контролируются на производстве. Для моделирования данного дефекта в среде SolidWorks создана геометрическая модель разделительной мембраны, которая разделена на 2 части (рисунок 3.4.3): часть со сварным швом (1) и часть без сварного шва (2).

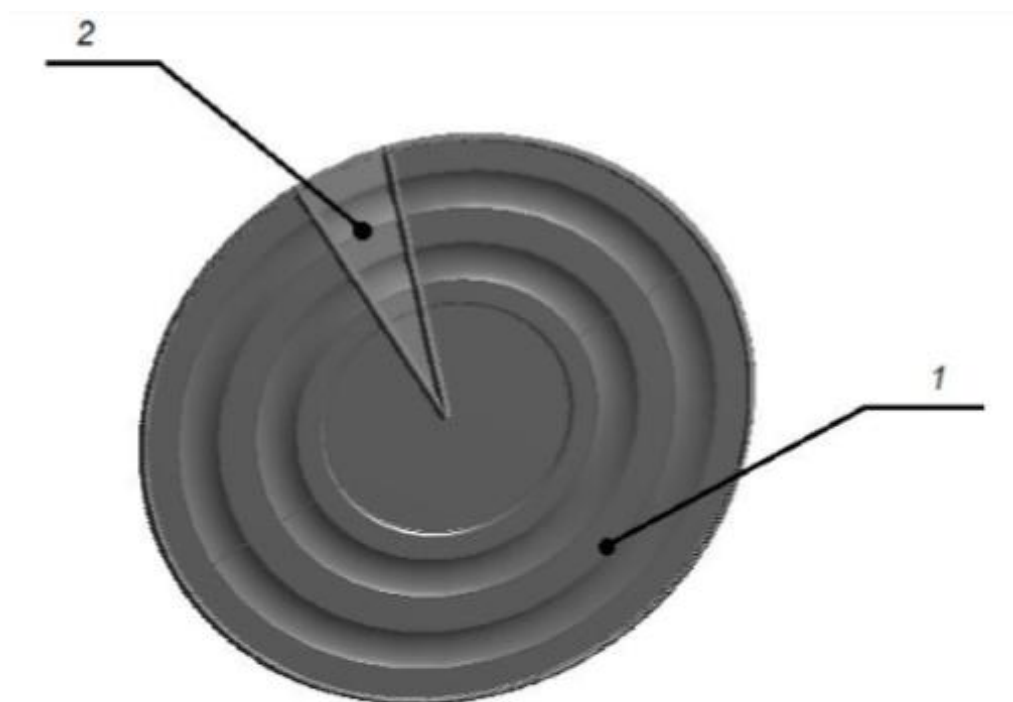


Рисунок 3.3.2 – Разделительная мембрана, разделенная на две части

Сварной шов моделировался вышеупомянутым способом, соединение между мембраной и элементом без сварного шва делалось с помощью конструктивных точек (construction points), которые дают возможность сделать два различных геометрических элемента «единым целым». Было осуществлено 3 исследования:

- а) сварной шов отсутствовал на 3% длины сварного шва;
- б) сварной шов отсутствовал на 5% длины;

в) сварной шов отсутствовал на 10% длины.

Значения частот, на которых наблюдается наибольшее относительное изменение частоты собственных колебаний, представлены в таблице 2.3.3. Наибольшее изменение происходит на частотах, которые соответствуют колебаниям нижней части корпуса и измерительной системы (моды 3-5, 1417). Относительное изменение частот (см. таблицу 3.4.2) составляет от 0,27% до 1,55%.

Таблица 3.4.2 – частоты (Гц), соответствующие собственным колебаниям преобразователя, при различных значениях разгерметизации сварного шва

Номер моды	Опорная мембрана	Разгерметизация 3%	Разгерметизация 5%	Разгерметизация 10%
3	12956	12875	12818	12822
5	13416	13208	13380	1 3355
14	42910	42695	42762	42694
15	58662	58090	58068	58127
16	58871	58318	58233	58296
17	59502	59001	59090	58981

Таблица 3.4.3 – относительное изменение частот (в %) при различных значениях разгерметизации сварного шва

Номер моды	Разгерметизация 3%	Разгерметизация 5%	Разгерметизация 10%
3	0,63	1,07	1,03
5	1,55	0,27	0,45
14	0,50	0,34	0,50
15	0,98	1,01	0,91
16	0,94	1,08	0,98
17	0,84	0,69	0,88

3.4 Моделирование изменения толщины измерительной мембраны

Причинами изменения толщины измерительной мембраны могут быть, например, коррозия измерительной мембраны или же изначально несоблюдение размера при создании детали. Слишком малая толщина мембраны также может привести к ее разрыву, что приведет к поломке датчика, а также к ухудшению метрологических характеристик. Для моделирования данного дефекта в среде

SolidWorks создается геометрическая модель измерительной мембраны с уже измененным размером, показанным на рисунке 3.5.1.

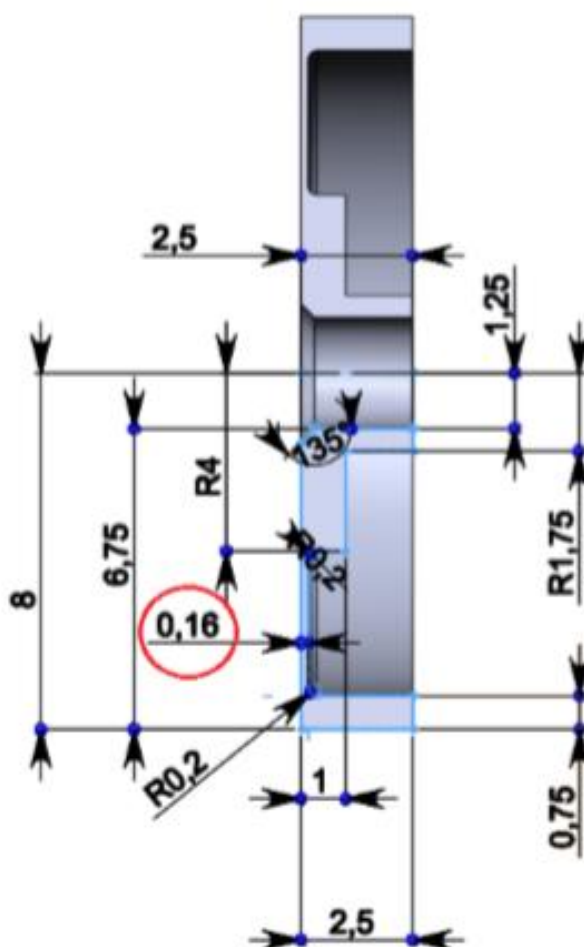


Рисунок 3.5.1 – Измерительная мембрана

Опорное значение толщины измерительной мембраны составляло 0,16 мм. Были проведены расчеты со значениями толщины 0,11 мм и 0,06 мм. Установлено, что наибольшее изменение частот наблюдается на модах 1, 2 и 15, 16, отвечающих колебаниям измерительной части преобразователя. Относительное изменение частот в этом случае для рассмотренных значений толщины мембраны находится в пределах 0,4-0,7%.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

3.5 Моделирование нарушения сварного шва «измерительная мембрана – шток»

Причинами разгерметизации сварного шва «измерительная мембрана-шток» могут быть, например, коррозия измерительной мембраны в области шва или же изначальный дефект. Это может привести к поломке датчика, а также к ухудшению метрологических характеристик.

Моделировалась ситуация, при которой сварной шов измерительной мембраны отсутствует на 50% длины. Такой дефект приводит в существенному изменению частот, связанных с колебаниями измерительной части преобразователя. Среднее относительное изменение частот составляет 810%, а максимальное на частоте 35865 Гц (мода 10) достигает 23,6%. Частоты, на которых наблюдается наибольшее относительное изменение значения частоты представлены в таблице 3.6.1.

Таблица 3.6.1 – частоты собственных колебаний при разгерметизации сварного шва «измерительная мембрана – шток»

Номера мод	Частоты, Гц		Относительное изменение частоты, %
	Опорные	С дефектом	
1	10785	11773	9,2
2	10904	11792	8,1
6	17369	17945	3,3
7	22707	24898	9,6
8	22785	24925	9,4
10	35865	44315	23,6
11	41702	46277	11,0
12	41957	46244	10,2

3.6 Обобщение влияния дефектов на частоты преобразователя

Все результаты, полученные в данном разделе при моделировании дефектов преобразователя представлены в таблицах 3.7.1 и 3.7.2. В таблицах указано вероятное изменение частоты для каждой моды в результате воздействия определенного дефекта. Если изменение не превышает 0,5% или значительно меньше среднего изменения соседних частот, то указано слово «незначительно».

Таблица 3.7.1 – относительное изменение значений частот преобразователя давления в зависимости от типа дефекта

Номер моды	Изменение толщины разделительной мембраны	Налипание инородного тела	Пластическая деформация мембраны
1	Незначительно	Незначительно	0,8-1,8%
2	Незначительно	Незначительно	0,8-2,2%
3	Незначительно	1-1,5%	1-3%
4	Незначительно	1-1,5%	1-3%
5	До 0,75% при изменении толщины в 2 раза	До 9,5%	1-3%
6	Незначительно	Незначительно	0,7-1,9%
7	Незначительно	Незначительно	2-4,4%
8	Незначительно	4%	2-4,4%
9	Незначительно	0,5%	1,6-2,5%
10	Незначительно	Незначительно	1-2%
11	Незначительно	Незначительно	1-2%
12	Незначительно	Незначительно	1-2%
13	Незначительно	2,5-3%	0,7-2,5%
14	Незначительно	2,5-3%	0,7-2,9%
15	Незначительно	1,5-2%	1-2%
16	Незначительно	1,5-2%	1-2%
17	Незначительно	3%	2-3%

Таблица 3.7.2 – относительное изменение значений частот преобразователя давления в зависимости от типа дефекта (продолжение)

Номер моды	Нарушение сварного шва «разделительная мембрана –корпус»	Изменение толщины измерительной мембраны	Нарушение сварного шва «измерительная мембрана – шток»
1	Незначительно	0,4-0,7%	8-9%
2	Незначительно	0,4-0,7%	8-9%
3	0,6-1%	Незначительно	Незначительно
4	0,6-1%	Незначительно	Незначительно
5	0,5-1,5%	Незначительно	Незначительно
6	Незначительно	Незначительно	3,3%
7	Незначительно	Незначительно	9,5%
8	Незначительно	Незначительно	9,5%
9	Незначительно	Незначительно	Незначительно
10	Незначительно	Незначительно	23,6%
11	Незначительно	Незначительно	10-11%
12	Незначительно	Незначительно	10-11%
13	0,3-0,5%	Незначительно	Незначительно
14	0,3-0,5%	Незначительно	Незначительно
15	0,4-1%	0,4-0,7%	Незначительно
16	0,4-1%	0,4-0,7%	Незначительно
17	Незначительно	Незначительно	Незначительно

Моделирование показало, что дефекты большее воздействие оказывают именно на те моды колебаний, в которых участвуют элементы конструкции, подвергнувшиеся дефекту. Большинство эффектов вызывают относительное изменение частот в пределах 0,5-1,5%, что требует использования точных методов спектрального анализа при исследовании реальных сигналов. Именно способность оценивать частоты в сигналах с данной точностью будет

использовано далее в качестве критерия при разработке численного метода оценки частот в выходном сигнале преобразователя.

3.7 Применимость разработанной системы компьютерного моделирования в других областях

Диагностика технического состояния на основе анализа частотного спектра сигналов применима в тех областях, где возникающие дефекты, неисправности и отказы оказывают влияние на частотные характеристики диагностируемых объектов. Помимо рассмотренной в предыдущих разделах конструкции преобразователя давления, разработанная система моделирования применима как для других типов конструкции и принципов действия преобразователей давления, так и для других средств измерения, например, расходомеров, а также для диагностики технического состояния объектов, частоты и вибрации которых могут быть измерены дополнительными средствами, например, с помощью акселерометров. Подобные задачи встречаются в таких отраслях, как машиностроение, строительство, эксплуатация зданий и сооружений и других. Основным требованием применимости разработанного подхода является осуществимость практической оценки частотного спектра диагностируемого объекта. Рассмотрим применение разработанной системы компьютерного моделирования для других типов конструкции преобразователей давления. Для этого проведем моделирование и расчеты для первичного измерительного преобразователя давления, изготовленного ЗАО «НПК ВИП» (г. Екатеринбург), и для преобразователя давления без разделительной мембраны на его основе, изготовленные ООО «ИТеК ББМВ» (г. Челябинск). Первичный измерительный преобразователь давления представляет собой измерительную систему, состоящую из трех частей. Чертеж основной части с нанесенными размерами в осевом разрезе представлен на рисунке 1.3.1. Сборка в разрезе представлена на рисунке 3.3.1.

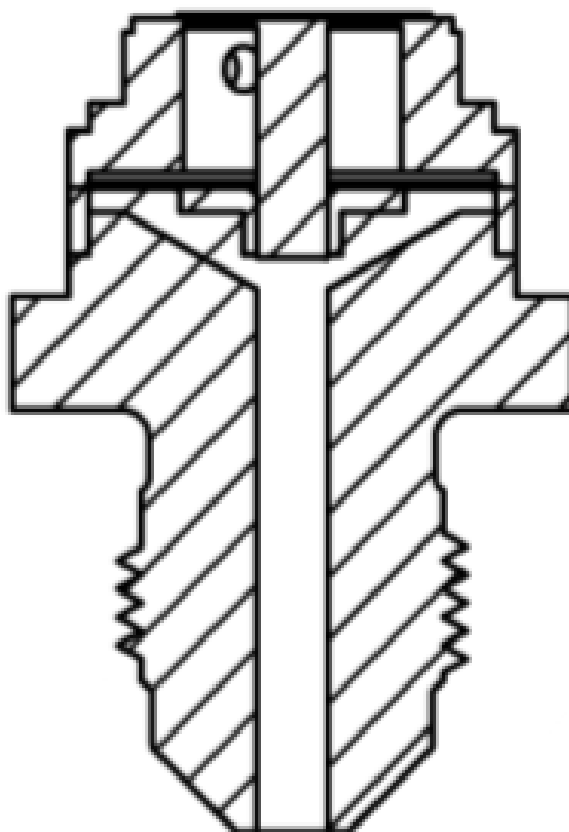


Рисунок 3.7.1 – Измерительный преобразователь в сборе

В результате применения описанной в предыдущих разделах системы компьютерного моделирования для данного первичного измерительного преобразователя давления, были получены оценки 7 мод, каждой из которых соответствует определенная частота и форма колебаний (см. таблицу 2.4.1). На рис. 3.3.2 представлены частоты.

Таблица 3.8.1 – рассчитанные моды колебаний первичного измерительного преобразователя давления

Номер моды	Частота, Гц
1	24188
2	24261
3	29346
4	42483
5	43623
6	46543
7	47897

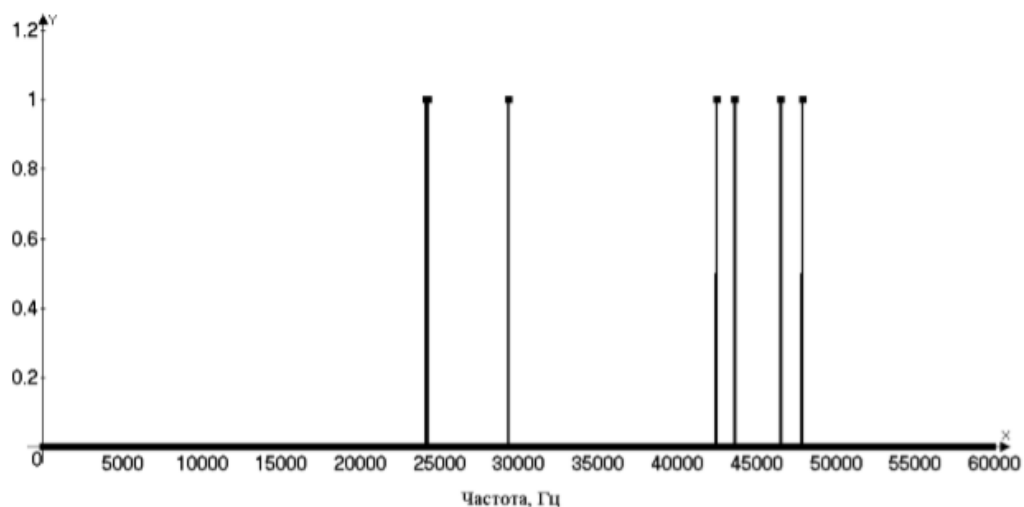
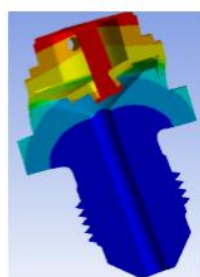
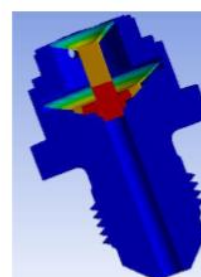


Рисунок 3.7.2 - Значения частот, полученные в результате расчетов для
первичного измерительного преобразователя давления

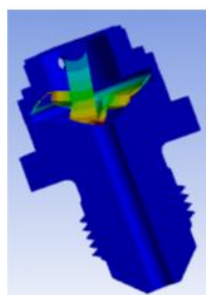
На рисунке 3.3.3 представлены некоторые характерные формы колебаний конструкции первичного измерительного преобразователя.



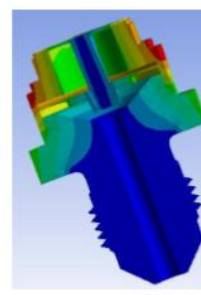
Частота – 24188 Гц



Частота – 29346 Гц



Частота – 42483 Гц



Частота – 46543 Гц

Рисунок 3.7.3 - Формы колебаний, соответствующие модам 1, 3, 4 и 6

Для данной конструкции первичного измерительного преобразователя было проведено моделирование следующих дефектов с использованием разработанной системы компьютерного моделирования: нарушение сварного шва «измерительная мембрана – шток» и уменьшение толщины измерительной мембраны. Причинами изменения толщины измерительной мембраны могут быть, например, коррозия или изначальное несоблюдение размера при создании детали. Слишком малая толщина мембраны может привести к ее разрыву, что приведет к поломке датчика, а также к ухудшению метрологических характеристик. Порядок моделирования и рассмотренные значения толщины мембраны аналогичны описанным при в разделе 2.3.

Результаты расчетов и сравнение их с оценками, полученными при отсутствии дефектов, представлены в таблицах 2.4.2, 2.4.3 и 2.4.4. Относительное изменение частот вследствие уменьшения толщины измерительной мембраны составляет от 3-4% на модах 1-3 до 10-12% на модах 4-7.

Таблица 3.8.2 – относительное изменение частот первичного измерительного преобразователя при разгерметизации сварного шва «измерительная мембрана – шток»

Номер моды	Относительное изменение частоты, %	Частота, Гц	
		24188	23916
1	1,125	24188	23916
2	0,997	24261	24019
3	1,642	29346	28864
4	8,526	42483	38861
5	7,629	43623	40295
6	0,019	46543	46552
7	0,570	47897	47624
		опорный	

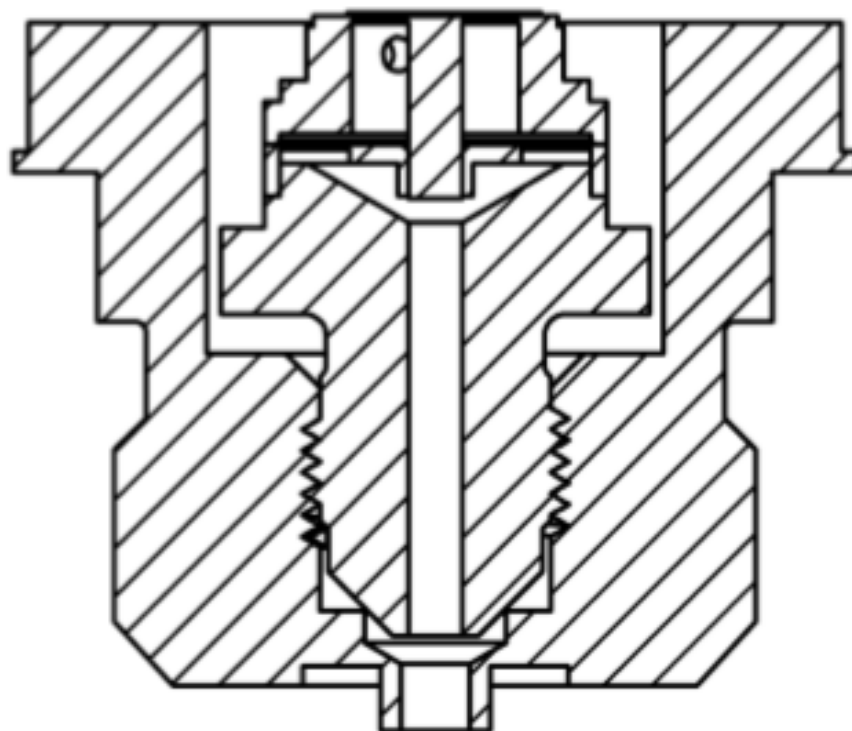


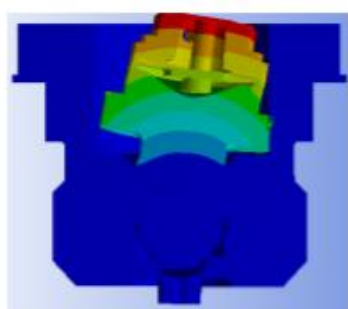
Рисунок 3.7.4 – Общий вид конструкции преобразователя давления с корпусом без разделительной мембраны

В результате применения описанной в предыдущих разделах системы компьютерного моделирования для конструкции данного типа были получены оценки 17 мод колебаний конструкции преобразователя, каждой из которых соответствует определенная частота и форма колебаний (см. таблицу 3.3.5).

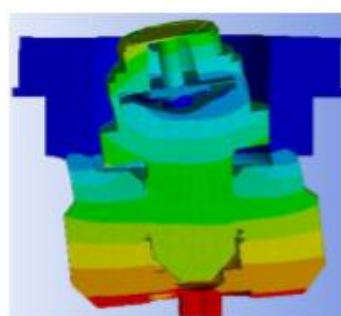
Таблица 3.8.5 – рассчитанные моды колебаний преобразователя давления без разделительной мембраны

Но- мер моды	Ча- стота, Гц	Краткое описание колебания
1	11219	Колебания измерительной части датчика как консольной балки
2	11364	
3	17572	Колебание измерительной части относительно центральной оси
4	22584	Колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса
5	22600	
6	27074	Продольные колебания центральной области измерительной части датчика
7	32250	Колебания измерительной части датчика и нижней части корпуса относительно центральной оси

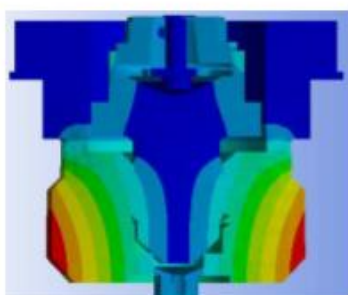
На рисунке 3.7.5 представлены некоторые характерные формы колебаний конструкции преобразователя без разделительной мембраны.



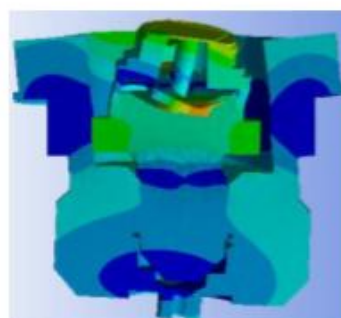
Частота – 11219 Гц



Частота – 22584 Гц



Частота – 32250 Гц



Частота – 49724 Гц

Рисунок 3.7.5 - Формы колебаний, соответствующие модам 1, 4, 7 и 13

Для сравнения с данными, полученными в предыдущем разделе, были проведены исследования влияния дефектов конструкции на амплитудно-частотную характеристику преобразователя с корпусом без разделительной мембраны. У датчика данного типа среда непосредственно контактирует с измерительной мембраной, поэтому для исследования был выбран такой дефект,

как нарушение сварного шва «измерительная мембрана-шток». Причины разгерметизации сварного шва могут быть разные, например, коррозия измерительной мембран в месте сварного шва. Это приведет к поломке датчика, а также к ухудшению метрологических характеристик. Моделировалось отсутствие сварного шва на 50% его длины, результаты сравнивались с опорными значениями частот, приведенными в таблице 3.3.5. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.6.

Таблица 3.7.6 – относительное изменение частот преобразователя без разделительной мембраны при нарушении сварного шва «измерительная мембрана – шток»

Номер моды	Относительное изменение частоты, %	Частота, Гц	Номер моды	Относительное изменение частоты, %	Частота, Гц
1	0,125	11219	9	1,471	37319
2	0,123	11364	10	2,171	37548
3	0,028	17572	11	0,215	44713
4	0,013	22584	12	0,058	49573
5	0,013	22600	13	0,107	49724
6	0,886	27074	14	0,038	52163
7	0,003	32250	15	0,063	52203
8	1,044	32940	16	1,461	53868
			17	1,305	54083

Как видно из таблицы 3.7.6 наибольшее относительное изменение частот наблюдается на модах 6, 8, 9, 10, 16 и 17, связанных с колебаниями измерительной части преобразователя. При этом относительное изменение частот, доступное для оценки, находится в пределах 0,8-2,1%, что, с одной стороны, в целом совпадает с выводами, полученными в предыдущем разделе для преобразователя другого типа, с другой стороны, позволяет утверждать, что

собственные частоты являются уникальной характеристикой для данного типа конструкции датчика.

Таким образом, разработанная в данной главе система компьютерного моделирования позволяет получать оценки собственных резонансных частот для различных типов конструкции датчиков, причем данные оценки являются уникальными характеристиками каждой конкретной моделируемой конструкции, что позволяет использовать полученную информацию для разработки систем диагностики технического состояния данных объектов.

Проведенное компьютерное моделирование показало целесообразность моделирования конструкции преобразователя и оценки его амплитудно-частотной характеристики методом конечных элементов. Разработанная система компьютерного моделирования, основанная на применении современных технологий, в частности программного пакета ANSYS, позволяет в интерактивном режиме исследовать амплитудно-частотные характеристики преобразователей. Представленная система применима и в различных областях – в приборостроении, автомобилестроении, строительстве, при эксплуатации зданий и сооружений, для исследования метрологических и прочностных характеристик датчиков физических величин, а также для анализа влияния неисправностей в приборах, дефекты которых имеют влияние на их частотные характеристики (пьезодатчики, дифференциальные преобразователи, расходомеры и др.).

Компьютерное моделирование влияния дефектов конструкции преобразователя на значения собственных частот позволило получить количественные оценки ожидаемого изменения значений частот вследствие различных дефектов. Установлено, что изменение толщины разделительной мембраны преобразователя не приводит к заметному изменению частоты колебаний, поскольку максимальное изменение частоты при уменьшении толщины мембраны в два раза составляет не более 0,75%.

При налипании тела с массой, составляющей 20% массы мембраны, частоты изменяются на значение 1-4%, при этом изменение претерпевает большинство

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		95

частот. Пластическая деформация мембраны приводит к увеличению частот, изменение достигает 3-4%. Нарушение сварного шва «разделительная мембрана – корпус» (на величину от 3 до 10% длины шва) может привести к относительному изменению частот на 0,3-1,5%.

Моделирование также показало, что существенное изменение параметров преобразователя (например, нарушение сварного шва «измерительная мембрана – корпус» на 50% длины или изменение толщины измерительной мембраны в два раза) может привести к заметному изменению частот – до 10-12%.

Проведенное исследование с применением разработанной системы компьютерного моделирования позволяет заключить, что:

1. Частоты собственных колебаний преобразователя связаны с параметрами его конструкции и могут служить в качестве признаков его технического состояния.

2. Дефекты и неисправности конструкции оказывают влияние на параметры амплитудно-частотной характеристики преобразователя. Различным дефектам соответствует разное изменение частот колебаний.

3. Дефекты оказывают большее воздействие именно на те моды колебаний, в которых участвуют элементы конструкции, подвергнувшиеся дефекту.

4. Большинство дефектов вызывают относительное изменение частот в пределах 0,5-1,5%, что требует использования точных методов спектрального анализа при исследовании реальных сигналов.

Вследствие этого при разработке методики диагностики необходимо разрабатывать алгоритмы оценки частот, позволяющие оценивать частоты с точностью не меньшей 0,5%. Именно способность оценивать частоты в сигналах с данной точностью будет использована далее в качестве критерия эффективности при разработке численного метода оценки частот в выходном сигнале преобразователя давления. Также потребуются проведение экспериментальных исследований влияния неисправностей на спектр выходного сигнала для проверки достоверности полученных результатов.

Получен ответ на главный вопрос магистерской диссертации, а именно рассчитана зависимость амплитуды колебаний от частоты подаваемого давления (см. рисунок 3.3.6):

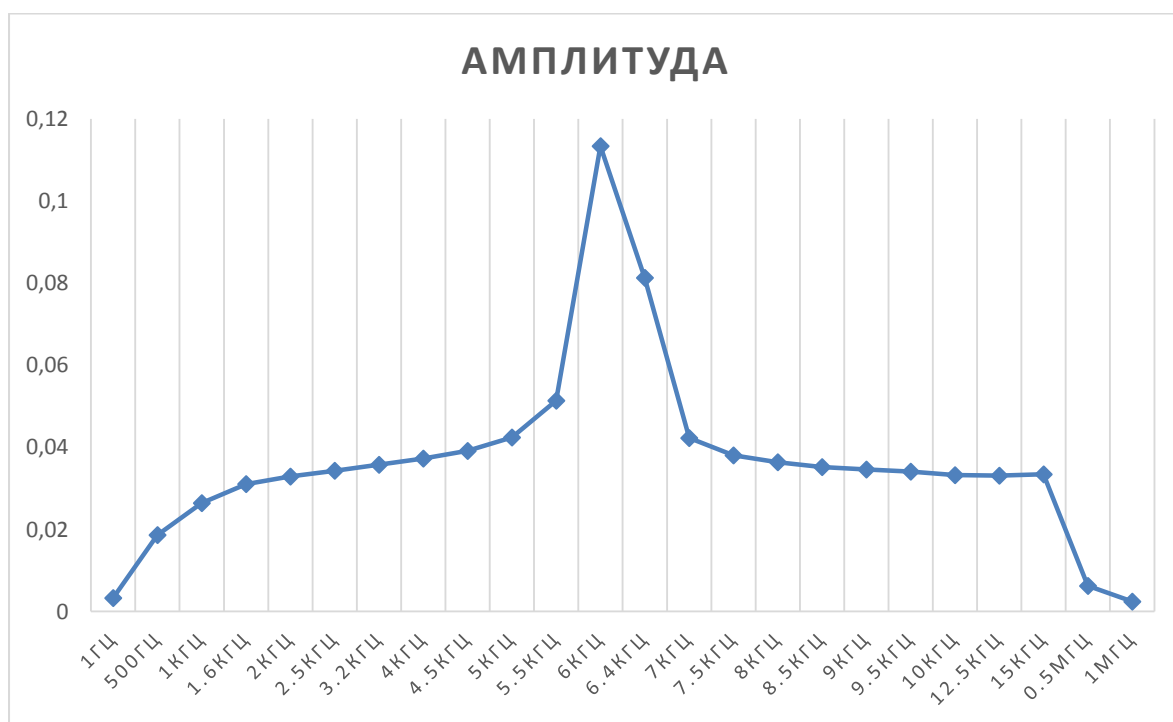


Рисунок 3.8.6 – Зависимость амплитуды колебаний от частоты давления

Вывод: найдена частота резонанса и целесообразно эту частоту использовать в проверочном сигнале. Следовательно, задачу определения частоты для данного метода самодиагностики датчика давления, можно считать выполненной.

Выводы по разделу 3:

В ходе написания третьего раздела были найдены характеристики разработанной математической модели. Произведена оценка частот собственных колебаний конструкции преобразователя.

Рассмотрены различные ситуации нарушения работы датчика, а именно: налипание на разделительную мембрану инородного тела, пластической деформации разделительной мембраны, изменения толщины измерительной мембраны, нарушение сварного шва.

Была получена зависимость чувствительности (амплитуды колебания) мембраны от частоты колебаний измеряемого давления.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		98

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа выполнена в строгом соответствии с требованиями технического задания на проект.

1. Проведен анализ современных подходов к оценке технического состояния датчиков давления, в итоге представляется возможным выбрать ряд типичных причин нарастания погрешности и отказов датчиков, которые в то же время предположительно существенно влияют на частотную характеристику датчика.

2. В программе Solid Works была разработана модель первичного измерительного преобразователя, а именно: защитный корпус, разделительная мембрана, корпус самого датчика, внутреннюю мембрану.

3. В программе Solid Works, расширение Simulation были найдены характеристики математической модели первичного измерительного преобразователя давления.

Таким образом, все поставленные задачи решены и цель ВКР достигнута.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		99

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 8.009-84 ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
2. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
3. ГОСТ Р 8.734-2011 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.
4. МИ 1951-88 ГСИ. Динамические измерения. Термины и определения.
5. МИ 2021-89 ГСИ. Метрологическое обеспечение гибких производственных систем. Основные положения. М., 1991.
6. Алексеев, К.А. Вейвлет ряды в задаче оценивания собственных частот датчиков // Датчики и системы. – 2001. – №12
7. Алексеев, К.А. Задача идентификации полных и частных динамических характеристик высокочастотных пьезоэлектрических датчиков переменных давлений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2000. – №7.
8. Андреева, Л.Е. Упругие элементы прибора. М.: Машгиз, 1962.
9. Багдатьян, Е.Е. Идентификация преобразователей переменных давлений / Е.Е. Багдатьян, А.А. Ефимова // Измерительная техника. – 1986. – №6.
10. Багдатьян, Е.Е. Импульсная установка для идентификации датчиков переменных давлений / Е.Е. Багдатьян, А.А. Ефимова, Э.Б. Санина //Измерительная техника. – 1989. – №3.
11. Бакшеева, Ю.В. Резистивные датчики температуры с метрологическим самоконтролем / Ю.В. Бакшеева, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // Датчики и системы. – 2011. – №4. – с. 62-70.
12. Бакшеева, Ю.В. Организация метрологического самоконтроля в датчиках с упругими чувствительными элементами [Электронный ресурс] / Ю.В. Бакшеева, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // Девятая международная научная школа «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов», 26-30 октября 2009 г. – СПб.: электронное издание.

					ИОУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		100

13. Белозубов, Е.М. Моделирование деформаций мембран датчиков давления / Е.М. Белозубов, В.А. Васильев, П.С. Чернов // Измерительная техника. – 2009. – №3. – с. 33-36.

14. Беляков, А.О. Определение моментов инерции крупногабаритных тел по колебаниям в упругом подвесе, Диссертация на соискание ученой степени к.ф.-м.н., Москва, 2005.

15. Бендат, Дж. Прикладной анализ случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол. М.: Мир, 1989. – 540 с.

16. Богуш, М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков с использованием конечно-элементных математических моделей // Приборы. – 2007. – №8. – с. 32-39.

17. Богуш, М.В. Анализ функции преобразования пьезоэлектрических датчиков давления методом конечных элементов / М.В. Богуш, Э.М. Пикалев // Известия ЮФУ. Технические науки.- 2008. - №2.- с. 74-84.

18. Бушев, В.В. Серия микроэлектронных датчиков давления МИДА / В.В. Бушев, О.Л. Николайчук, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2000. – №1. – с. 21.

19. Васильев, В.А. Принципы построения моделей измерительных приборов и систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – №6. – с. 40-45.

20. Воронин, В.В. Множество возможных дефектов и виды технических состояний // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №6. – с. 41-44.

21. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / Генкин М.Д., Соколова А.Г. М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

22. Генри, М. Самоаттестующиеся датчики // Датчики и системы. – 2002. – №1.

23. Дружинин, И.И. Контроль метрологических характеристик, встраиваемых в агрегаты вихретоковых преобразователей / И.И. Дружинин, В.В. Кочугуров // Измерительная техника. – 1988. – N11. – с.37-38.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		101

24. Дружинин, И.И. Метрологический самоконтроль в интеллектуальных датчиках удельной электрической проводимости жидкости // Материалы II российской конференции с международным участием «Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения (теория, методы, алгоритмы, исследования и разработки)». Тезисы докладов. ИПУ РАН. – М., 2010. С. 422-429.

25. Евтюшенков, А.М. Исследование метрологических характеристик преобразователя давления «САПФИР-22Д» / А.М. Евтюшенков, Ю.Ф. Кияченко, А.В. Крюков //Измерительная техника. – 1989. – №2.

26. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

27. Ибряева, О.Л. Оптимизация частоты дискретизации сигнала при использовании метода Прони / О.Л. Ибряева, А.С. Семенов, А.Л. Шестаков // Доклады 13-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2011», Москва. – 2011. – Вып. XIII, т. 1. – с. 108-110.

28. Иванов, Ю.В. Установка для анализа ударного спектра виброударных импульсов / Ю.В. Иванов, В.П. Трофимов // Измерительная техника. – 1985. – №3.

29. Измерительный преобразователь температуры с контролем метрологической исправности: заявка на пат. 2010142833 Рос. Федерация: МПК G01D 3/00 / Ю.В. Бакшеева, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов. – заявл. 07.10.2010.

30. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб.пособ. / В.А. Бруяка и др. – Самара: Самар, гос. техн. ун-т, 2010. - 271 с.: ил.

31. Иосифов, В.П. Алгоритм Берга в задачах спектрального оценивания коротких откликов датчиков / В.П. Иосифов, К.А. Алексеев // Приборы и системы управления. – 1999. – №7.

32. Исмибейли, Р.Э. Моделирование магнитных элементов и устройств методом конечных элементов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – №4. – с. 21-27.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		102

33. Каюков, И.В. Сравнительный анализ различных методов оценки частоты сигнала / И.В. Каюков, В.Б. Манелис // Радиоэлектроника. – 2006. – №7.

34. Кирюшин, О.В. Управление техническими системами: курс лекций. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2003. – 80 с.

35. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи / Козлов А.И., Пирогов А.В., Стучебников В.М. // Датчики и системы. – 2008. – №1. – С. 6-11.

36. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи / Козлов А.И., Пирогов А.В., Стучебников В.М. // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 50-53.

37. Комаров, А. Возможности ANSYS 15.0: геометрия, сетки, конструкционный анализ / А. Комаров, О. Новаковская, А. Клявлин // САПР и графика. – 2014. – №2. – С. 64-69.

38. Кухаренко, Б.Г. Технология спектрального анализа на основе быстрого преобразования Прони / Б.Г. Кухаренко // Информационные технологии. – 2008. – №4. – С. 38-42.

39. Лукашев А.П., Карпов П.А. и Беляков А.Е. Датчик давления // SU 1117472 A G01 L 9/10, 07.10.1984.

40. Маергойз, Л. С. Об одной модификации метода Прони / Л.С. Маергойз, Б.Н. Варава // Сиб. журн. индустр. матем. – 2007. – том 10. – №2.

41. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990.

42. Мартыненко, В.Т. Исследование причин, влияющих на погрешность преобразования датчиков разности давлений «Сапфир-22» // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – №6. – с. 31-34.

43. Михайлов, П.Г. Разработка и исследование методов и средств диагностики элементов и структур микроэлектронных датчиков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – с. 45-47.

44. Мулев, Ю.В. Манометры. М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 280 с.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		103

45. Мясникова М. Г. Измерение параметров электрических сигналов на основе метода Прони : дис. – Диссертация на соискание ученой степени к. т. н., Пенза, 2007.

46. Печук, В.И. Определение динамических характеристик бесклеевых тензометрических преобразователей давления / В.И. Печук, В.М. Захаренков, В.Ю. Скрипчук, А.Ю. Швец // Измерительная техника. – 1989. – №1.

47. Пинчук, Р. Три составляющих успеха «Данфосс» в области контроля давления // Компоненты и технологии. – 2010. – №1. – с. 20-23

48. Пирогов, А.В. Экспериментальное определение собственных частот двухмембранных тензопреобразователей давления / А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2006. – №4.

49. Сапожникова, К.В. Метрологический диагностический контроль // Метрологическая служба в СССР. – 1991. – №2.

50. Сапожникова, К.В. Метрологический контроль как компонент диагностики гибких производственных систем и робототехнических комплексов/ К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов, В.В. Кочугуров // Испытания, контроль и диагностирование гибких производственных систем (по материалам семинара 1985 г. в ИМАШ АН им. Благонравова). – М.: Наука. – 1988. – с. 269-273.

51. Сапожникова, К.В. Метрологическое обеспечение встраиваемых средств измерений/ К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов // Измерительная техника. – 1992. – №6. – с. 59-60.

52. Сапожникова, К.В. Потребность в стандартах по самодиагностируемой и самоаттестуемой аппаратуре / К.В. Сапожникова, М. Генри, Р.Е. Тайманов // Датчики и системы. – 2006. – №6. – с. 51-57.

53. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

					ЮУрГУ – 12.04.01.2019.308-181.ВКР	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		104