

На правах рукописи



**Бушуев Олег Юрьевич**

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ДАВЛЕНИЯ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и  
комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**ЧЕЛЯБИНСК – 2015**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет)

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор  
Шестаков Александр Леонидович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
Ряжских Виктор Иванович,  
ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», кафедра прикладной математики и механики, зав. кафедрой;

доктор технических наук, профессор  
Ясовеев Васих Хаматович,  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», кафедра информационно-измерительной техники, зав. кафедрой

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное унитарное предприятие "Уральский научно-исследовательский институт метрологии" (г. Екатеринбург)

Защита состоится 28 марта 2016 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.14 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на сайте: <http://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229814/bushuev-oleg-yurevich>

Автореферат разослан 19 января 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физ.-мат. наук, доцент



А.В. Келлер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В настоящее время наблюдается рост интереса со стороны промышленности к так называемым интеллектуальным средствам измерения, обладающим большими возможностями по сравнению с традиционными средствами измерения. Одной из составляющих интеллектуального средства измерения является обеспечение возможности диагностики и/или самодиагностики его технического состояния в процессе эксплуатации, что позволяет своевременно получать информацию об его функционировании. Эта информация имеет важное значение для принятия решения о продолжении использования 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 даст положительный экономический эффект и имеет ключевое значение для таких важных отраслей, как атомная, радиохимическая и аэрокосмическая промышленность. Это обуславливает актуальность научной проблемы поиска принципов и способов диагностики состояния датчиков, в частности датчиков давления.

Как правило, диагностика технического состояния объекта или системы осуществляется на основе избыточности – пространственной или информационной. В случае информационной избыточности особое значение приобретает модель объекта или системы и вычислительные методы, применяемые для оценки параметров данного объекта или системы. Это обстоятельство определяет неразрывную связь способов диагностики технического состояния объектов с моделированием и используемыми численными методами, причем для сложных систем необходимым является применение машинных методов вычислений и компьютерного моделирования.

Вопросами разработки и исследования методов обнаружения и диагностики неисправностей в технологических процессах и системах в разное время занимались Р. Айзерманн, В. Венкатасубраманиан, Р. Паттон, И.В. Рудакова, Л.А. Русинов, А.С. Семенов, С. Симани, К. Стивен, Дж. Чен, А.Л. Шестаков и многие другие. В развитие теории самоаттестации средств измерений внесли большой вклад Д. Кларк, М. Генри, Дж. Янг. Общие вопросы метрологического самоконтроля разрабатывали Ю.В. Бакшеева, К.В. Сапожникова, Р.Е. Тайманов. Указанные работы имеют фундаментальный характер, в них заложены основные подходы к диагностике состояния, но, к сожалению, в них недостаточно исследован вопрос оценки технического состояния датчика давления и его основной части – измерительного преобразователя.

Данное диссертационное исследование посвящено компьютерному моделированию дефектов конструкции преобразователей давления и разработке численного метода оценки изменения технического состояния преобразователей на основе анализа их выходного сигнала. Моделированием преобразователей давления и их элементов

занимались Е.М. Белозубов, В.А. Васильев, М. Зарник, А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников, А.О. Чернявский. Но, к сожалению, создаваемые модели, как правило, носят конкретный характер, связанный с решаемой задачей, и не подходят для анализа дефектов преобразователей давления.

В диссертационном исследовании разработана система компьютерного моделирования преобразователей давления на основе метода конечных элементов с использованием среды ANSYS. Компьютерная модель используется для расчета собственных колебаний конструктивных элементов преобразователей и исследования влияния неисправностей (дефектов конструкции) преобразователя на его амплитудно-частотную характеристику. Изучение модели позволяет провести теоретическое исследование и обосновать возможность диагностики технического состояния преобразователя на основе анализа его амплитудно-частотной характеристики.

Представление преобразователя в виде линейной системы с колебательными звеньями и модель выходного сигнала преобразователя используется для изучения влияния параметров конструкции преобразователя на его выходной сигнал, разработки и анализа эффективности численного метода оценки частот в выходном сигнале. Методы оценки частотного спектра сигнала датчиков исследовали М.Г. Мясникова, А.Г. Терехина, Б.В. Цыпин. Данные работы содержат ценные результаты, связанные с оценкой параметров сигнала датчика, но, к сожалению, за рамками данных работ осталась задача точной оценки частот сигнала в условиях низкого отношения сигнал/шум (до 10 дБ), требующая разработки специальных численных методов.

Несмотря на наличие исследований в данной области, задача создания моделей, численных методов и алгоритмов оценки изменения технического состояния преобразователя давления на основе анализа его амплитудно-частотной характеристики полностью не решена и рассматривается в данном диссертационном исследовании.

**Цель работы** – разработка системы компьютерного моделирования преобразователя давления и численного метода оценки изменения его амплитудно-частотной характеристики, реализованного в виде комплекса программ, для диагностики технического состояния преобразователя.

#### **Основные задачи исследования.**

1. Анализ современных подходов к моделированию преобразователей давления и оценке изменения их технического состояния.
2. Разработка системы компьютерного моделирования преобразователей давления и исследование влияния различных дефектов конструкции преобразователя на его амплитудно-частотную характеристику.
3. Разработка численного метода оценки частот в выходном сигнале преобразователя.
4. Реализация численного метода в виде комплекса проблемно-ориентированных программ.
5. Анализ эффективности разработанного численного метода на основе вычислительных и натуральных экспериментов.

**Методы исследования.** При выполнении работы для разработки численного метода использовались методы вычислительной математики, теории алгоритмов, математический аппарат теории цифровых измерений и обработки сигналов. Для теоретического исследования возможности диагностики технического состояния преобразователя давления на основе анализа его частотных характеристик использовались теория линейных цепей и сигналов, теория систем и автоматического управления, теория механических колебаний, теория метода конечных элементов. Для проведения экспериментов и обработки их результатов использовались методы статистического анализа, методы спектрального анализа сигналов, элементы теории планирования эксперимента. Для моделирования и расчетов использовались система компьютерной математики MATLAB и методы компьютерного моделирования пакета ANSYS.

**Научная новизна работы.**

*В области математического моделирования*

1. Разработана система компьютерного моделирования преобразователя давления, включающая в себя создание геометрических моделей отдельных деталей конструкции преобразователя, объединение их посредством связей в единый объект и получение на основе расчетов оценок частот собственных колебаний конструкции преобразователя.

2. Проведено компьютерное моделирование преобразователей давления для исследования влияния дефектов конструкции преобразователя на его амплитудно-частотную характеристику, получены количественные оценки ожидаемого изменения значений частот вследствие различных дефектов.

*В области численных методов*

3. Разработаны численные методы увеличения точности оценки частот в выходном сигнале преобразователя давления с низким отношением сигнал/шум (до 10 дБ).

4. Разработан численный алгоритм оценки технического состояния преобразователя давления на основе анализа его амплитудно-частотной характеристики.

*В области комплексов программ*

5. Разработан комплекс программ для регистрации и оценки частот выходного сигнала преобразователя давления, отличающийся тем, что позволяет автоматизировать исследование амплитудно-частотной характеристики преобразователя в условиях низкого отношения сигнал/шум.

**Теоретическая значимость** работы состоит в обосновании возможности оценки технического состояния преобразователей давления на основе анализа частотного спектра выходного сигнала, а также в получении аналитической формулы для вычисления оптимальной частоты дискретизации, повышающей точность оценки для заданного набора частот. Полученные теоретические результаты вносят вклад в развитие теории технической диагностики приборов и систем и цифровой обработки сигналов.

**Практическая значимость** работы состоит в получении количественных оценок ожидаемого изменения значений частот вследствие различных дефектов преобразователя, создании численных алгоритмов и программ для оценки частот в выходном сигнале преобразователя давления. Показана применимость разработанной системы компьютерного моделирования в различных областях, где неисправности и отказы оказывают влияние на частотные характеристики диагностируемых объектов, что справедливо для таких отраслей, как приборостроение, автомобилестроение и двигателестроение, строительство, эксплуатация зданий и сооружений. Использование разработанного численного метода и комплекса программ повышает точность оценки амплитудно-частотной характеристики преобразователя давления и позволяет осуществлять контроль технического состояния преобразователя давления на основе анализа его выходного сигнала

**На защиту выносятся** следующие результаты, соответствующие трем пунктам паспорта специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам.

*В рамках разработки систем компьютерного моделирования (п. 8):*

1. Система компьютерного моделирования преобразователей давления.
2. Компьютерное моделирование дефектов конструкции преобразователя для определения количественных оценок изменения значений частот собственных колебаний конструкции преобразователя давления вследствие различных дефектов.

*В рамках разработки эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий (п. 3):*

3. Алгоритм и аналитическая формула для определения оптимальной частоты дискретизации сигнала, повышающей точность оценки частотных компонент сигнала.

4. Численный метод оценки частот в выходном сигнале преобразователя давления.

5. Теоретическое и экспериментальное обоснование эффективности предложенного численного метода и возможности его использования для оценки технического состояния преобразователя давления.

*В рамках реализации численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ (п. 4):*

6. Комплекс программ для регистрации и оценки частот выходного сигнала преобразователя давления с низким отношением сигнал/шум (до 10 дБ), включающий в себя:

– программный модуль для регистрации и обработки электрических сигналов первичных измерительных преобразователей давления;

– программный модуль для автоматизации исследований амплитудно-частотной характеристики первичных измерительных преобразователей давления;

– программные модули для оценки частот в выходном сигнале преобразователей давления;

– вспомогательные программы для вычисления необходимых параметров метода оценки частот в выходном сигнале преобразователей.

**Реализация и внедрение результатов.** Основные результаты работы были внедрены при выполнении ПНИР «Разработка и исследования методов оценки состояния преобразователя давления в ходе технологического процесса» (гос. контракт №П465) и «Исследование влияния внешних условий и технического состояния первичного измерительного преобразователя давления на его частотную характеристику» (соглашение №14.132.21.1601 от 01 октября 2012 года) в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. Результаты работы внедрены в деятельности предприятия ФГУП «Завод «Прибор» (г. Челябинск), а также используются в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению «Приборостроение».

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на 12 всероссийских и международных научно-практических конференциях, в том числе за рубежом.

**Публикации.** Всего по теме диссертации опубликовано 17 работ [1-17], в том числе 5 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК [1, 3-6], и 1 в издании, входящем в международную реферативную базу данных SCOPUS [2], 2 патента на изобретения [7-8] и 3 программы для ЭВМ [10-12]. Из работ, выполненных в соавторстве [1-2, 4-5, 14], в диссертацию включены только результаты, полученные ее автором.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 164 наименований, изложенных на 173 страницах, включая 62 рисунка, 19 таблиц и 5 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика структуры работы.

**В первой главе** рассмотрены современные подходы к моделированию и оценке технического состояния преобразователей давления. На основе анализа литературных источников установлено, что задача диагностики технического состояния наиболее важной части датчика давления – измерительного преобразователя – полностью не решена и является актуальной, в частности для разработки нового поколения интеллектуальных датчиков. Этим обусловлена необходимость разработки соответствующих моделей и методов, позволяющих оценить техническое состояние преобразователей давления в процессе эксплуатации. На основе анализа, проведенного в первой главе, была сформулирована цель исследования и уточнены задачи.

**Вторая глава** посвящена разработке системы компьютерного моделирования преобразователей давления и исследованию на основе модели влияния дефектов конструкции преобразователя на его собственные частоты.

Возбуждающее воздействие на входе преобразователя вызывает упругие колебания конструкции, которые в свою очередь отражаются в выходном сигнале. Входной процесс преобразуется в выходной в соответствии с динамическими характеристиками преобразователя, которые могут быть описаны передаточной

функцией или частотной характеристикой. Как у любой электромеханической конструкции, масса, геометрические размеры и упругие свойства преобразователя определяют его динамические свойства, в частности частоты собственных колебаний. При изменении значений собственных частот в результате появления дефектов конструкции, меняются параметры передаточной функции преобразователя и характеристики его выходного сигнала.

Из приведенных выше соображений следует, что существует взаимосвязь между параметрами конструкции преобразователя и его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). Следовательно, выходной электрический сигнал содержит информацию о динамических характеристиках преобразователя, которые изменяются при изменении его технического состояния, обусловленного дефектами конструкции. Это обстоятельство лежит в основе рассматриваемого подхода к решению задачи технической диагностики преобразователей давления.

В диссертационном исследовании проводится моделирование тензометрических преобразователей давления методом конечных элементов в среде ANSYS. Процесс моделирования включает в себя следующие этапы: создание конечно-элементной модели преобразователя давления, проведение расчетов собственных колебаний конструкции преобразователя, анализ результатов расчета и повторение расчетов с другими входными параметрами. Создание модели преобразователя состоит из следующих блоков: построение объемной геометрической модели, выбор материалов конструкции и указание их свойств, задание контактных условий, выбор типа конечного элемента и разбивка модели на конечные элементы (рис. 1). После создания конечно-элементной модели преобразователя давления накладываются граничные условия и проводятся расчеты необходимых параметров.

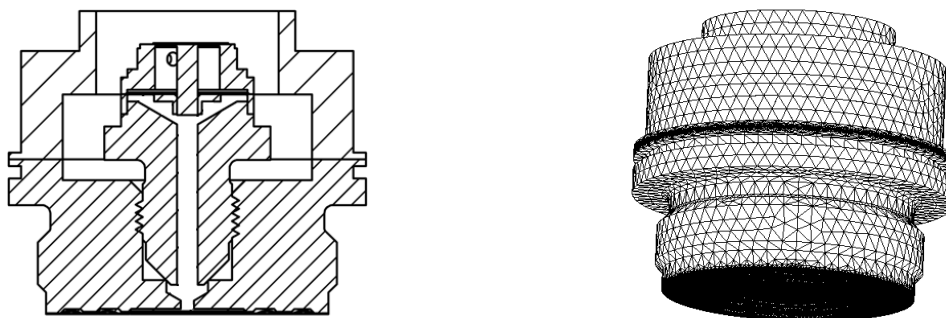


Рисунок 1 – Общий вид преобразователя давления с разделительной мембраной в разрезе (слева) и его геометрическая модель с сеткой конечных элементов (справа)

На основе разработанной системы компьютерного моделирования были проведены расчеты собственных частот преобразователя в отсутствии и при наличии дефектов: изменение геометрии мембраны; нарушение сварных соединений мембраны и корпуса; налипание инородных тел. Получены оценки для 17 мод колебаний конструкции преобразователя, каждой из которых соответствует определенная частота и форма колебаний (см. таблицу 1).



Таблица 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

Установлено, что изменение толщины разделительной мембраны преобразователя не приводит к заметному изменению частоты колебаний. При налипании тела с массой, составляющей 20% массы мембраны, частоты изменяются на значение 1-4%, при этом изменение претерпевает большинство 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) приводит к относительному изменению частот на 0,3-1,5%.

Проведенное моделирование и теоретическое исследование позволяет заключить, что частоты собственных колебаний преобразователя связаны с параметрами его конструкции и могут служить в качестве признаков его технического состояния, дефекты и неисправности конструкции оказывают влияние на параметры АЧХ преобразователя, различным дефектам соответствует разное изменение частот колебаний, причем дефекты оказывают большее воздействие именно на те моды, в которых участвуют элементы конструкции, подвергнувшиеся дефекту.

Большинство дефектов вызывают относительное изменение частот в пределах 0,5-1,5%, что требует использования точных методов анализа частотного спектра при исследовании реальных сигналов. Вследствие этого при разработке методики

диагностики необходимо разрабатывать алгоритмы оценки, позволяющие оценивать частоты с точностью не меньшей 0,5%.

**Третья глава** посвящена разработке численного метода оценки частот в выходном сигнале преобразователя. Метод оценки частот в сигнале, разрабатываемый в данном исследовании, основан на аппроксимации данных с помощью детерминированной экспоненциальной модели:

$$x[n] = \sum_{k=1}^p h_k z_k^{n-1}, \quad (1)$$

где  $1 \leq n \leq N$ ,  $N$  – число отсчетов в сигнале,  $p$  – порядок модели (число экспонент), комплексные константы  $h_k$  и  $z_k$  в общем случае определяются выражениями

$$h_k = A_k e^{i\theta_k}, \quad (2)$$

$$z_k = e^{(\alpha_k + i2\pi f_k)T}. \quad (3)$$

В главе приведено подробное описание последовательных шагов, составляющих метод, результатом которого являются оценки частот  $f_k$  в выходном сигнале преобразователя, а также формулы и соотношения, лежащие в основе предложенного метода оценки частот. Метод состоит из следующих шагов: сбор данных и предварительная обработка сигнала, составление матриц и векторов данных, решение матричных уравнений и определение коэффициентов характеристических полиномов, нахождение комплексных экспонент и оценка частот, повторение предыдущих шагов для каждого сегмента сигнала и получение итоговых оценок частот. Разработанный численный метод позволяет эффективно оценивать значения частот в выходном сигнале преобразователя с низким отношением сигнал/шум (до 10 дБ). Увеличение точности достигается за счет предварительной обработки сигнала, выбора подходящего значения частоты дискретизации и учета отношения сигнал/шум анализируемого отрезка сигнала при вычислении итоговой оценки.

Выбор подходящей частоты дискретизации осуществляется с помощью специально разработанного алгоритма определения частоты дискретизации, обеспечивающей наилучшие оценки для заданного набора частот. Частота подбирается таким образом, чтобы минимизировать число обусловленности матрицы при решении матричного уравнения. На основе разработанного алгоритма была получена аналитическая формула (4) для оптимальной частоты дискретизации  $Fs$  сигнала, содержащего  $n$  частот, причем  $f_1 < f_2 < \dots < f_n$ :

$$Fs = 4 \cdot n \cdot \frac{\sum_{k=1}^n f_k^2}{\sum_{k=1}^n (2k-1) f_k}. \quad (4)$$

Важной характеристикой «качества» сигнала является отношение сигнал/шум, которое в общем случае определяется как отношение мощности полезного сигнала к мощности шума. В реальном сигнале, отсчеты которого одновременно содержат и полезную, и шумовую составляющую, вычисление по общей формуле невозможно. Для преодоления этого затруднения в данном исследовании было предложено использовать следующее выражение для расчета отношения сигнал/шум реального сигнала:

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{n=1}^N (x[n])^2}{N \hat{\sigma}^2} - 1 \right), \quad (5)$$

где  $x[n] = s[n] + r[n]$  – дискретные значения реального сигнала, содержащие полезную и шумовую составляющую,  $N$  – число отсчетов,  $\hat{\sigma}$  – несмещенная оценка среднеквадратического отклонения шума, которая вычисляется путем анализа отсчетов в отсутствие полезного сигнала (то есть отклика на внешнее воздействие).

Отношение сигнал/шум зависит от количества отсчетов вследствие затухания полезного сигнала. Это обстоятельство имеет существенное значение для нашего метода, который применяется для анализа коротких отрезков реализации сигнала. Поэтому отношение сигнал/шум необходимо рассчитывать по формуле (5) для каждого конкретного анализируемого отрезка сигнала. Для получения итоговой оценки частоты сигнала в заданном частотном интервале предложено использовать формулу взвешенного среднего (6), в котором в качестве весов берется отношение сигнал/шум сегмента сигнала.

$$\hat{f} = \frac{\sum_{j=1}^M (SNR_j \cdot \hat{f}_j)}{\sum_{j=1}^M SNR_j} \quad (6)$$

где  $SNR_j$  – отношение сигнал/шум  $j$ -го сегмента сигнала,  $\hat{f}_j$  – оценка частоты на  $j$ -м сегменте сигнала,  $M$  – это число сегментов данной реализации сигнала.

Описанный численный метод был реализован в виде комплекса проблемно-ориентированных программ. Отдельные программы были написаны для регистрации и предварительной обработки сигнала (шаг 1 численного метода). Отдельная программа – для вычислений шагов 2-4 метода, различные блоки данной программы отвечают за различные процедуры, необходимые для реализации разработанного численного метода.

Для исследования эффективности предложенного метода были проведены численные расчеты. Типичные полученные оценки для двух частот представлены на рисунке 2. По оси абсцисс на рисунке отложены значения параметра  $p$  (порядок модели), по оси ординат отложены значения относительной погрешности оценки. Сплошная линия соответствует уровню относительной погрешности 0,5%. Штриховая линия соответствует относительной погрешности оценки соответствующей частоты в сигнале с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ). Оценки, полученные предложенным численным методом, указаны круговыми маркерами “о”.

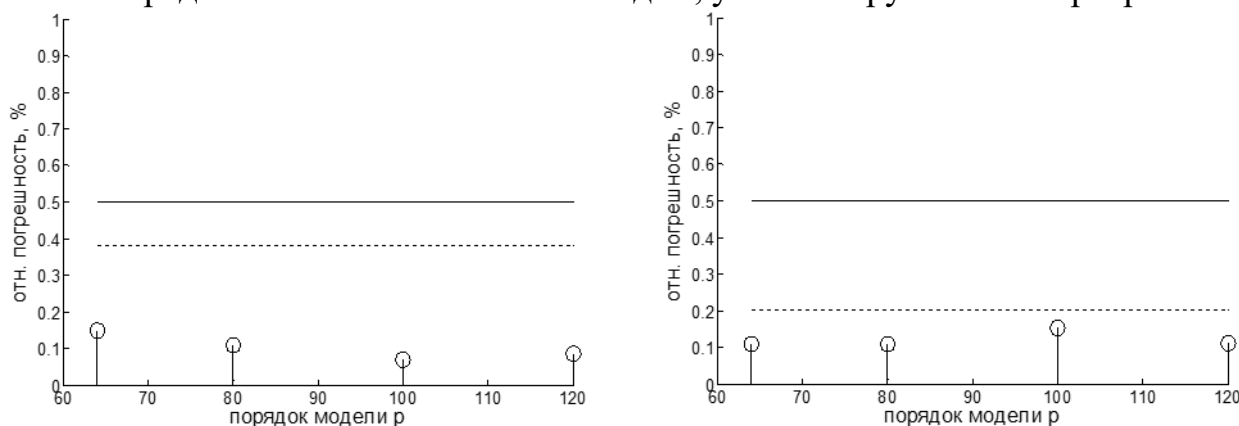


Рисунок 2 – Относительная погрешность оценки частоты 13853 Гц (слева) и 44310 Гц (справа) (маркерами указаны оценки, полученные предложенным методом)

**В четвертой главе** описаны экспериментальные исследования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) преобразователя и предложенного численного метода для анализа реальных сигналов. Эксперименты проводились с использованием специально разработанного стенда, позволяющего обрабатывать выходной сигнал преобразователя и получать оценки его АЧХ при различных внешних условиях. Определение АЧХ преобразователей давления проводилось способом, который был зарегистрирован автором в качестве изобретения.

Для проверки адекватности модели и подтверждения выдвинутых положений были проведены экспериментальные исследования возможных дефектов преобразователя. Выбор дефектов для исследования определялся, исходя из результатов моделирования – были выбраны те дефекты, которые, как ожидается, оказывают наибольшее воздействие на частотную характеристику, и которые можно осуществить без полного разрушения датчика. В рамках данного исследования было рассмотрено наличие присоединенной массы на разделительной мембране; воздействие давлением, превышающим предельно допустимое значение; дефект сварного шва «разделительная мембрана – корпус».

Результатами эксперимента являются рассчитанные значения частотных спектров сигналов преобразователей. В качестве примера на рисунке 3 представлены спектры сигнала в исходном состоянии и после воздействия давлением. Влияние присоединенной массы на частоты имеет сложный характер, отдельные частоты изменяются на величину от 2,5 до 9% (оценка моделирования – до 9,5%). Относительное изменение частот в случае воздействия давлением, превышающем предельно допустимое значение, составило от 1,8% до 6,8% (оценка моделирования – до 4,4%). Такие эффекты подтверждают наличие связи между параметрами амплитудно-частотной характеристики и техническим состоянием преобразователя давления и в целом совпадают с результатами моделирования.

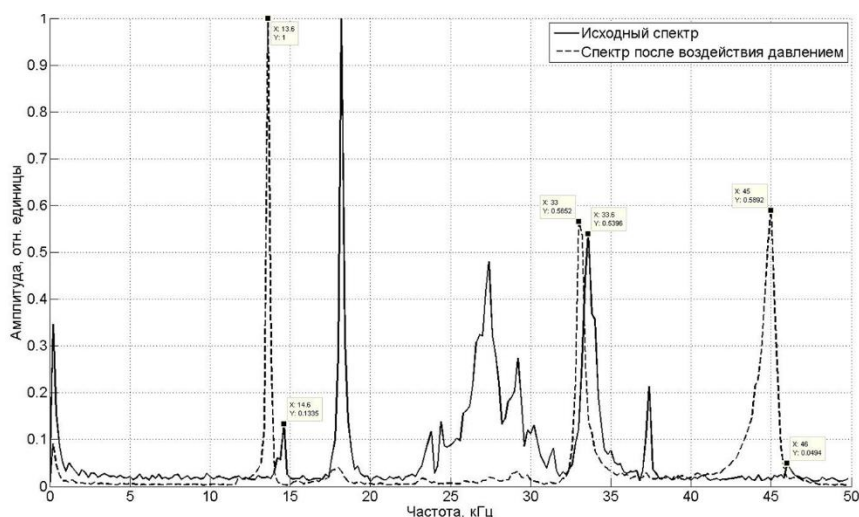


Рисунок 3 – Частотные спектры сигнала преобразователя в исходном состоянии (сплошная линия) и после воздействия давлением (пунктирная линия)

Для исследования эффективности разработанного численного метода были проведены оценки известной тестовой частоты следующим образом. К 10 реализациям реального сигнала прибавляли тестовый сигнал с разным значением частоты. Значение частоты изменялось от начального значения 16542 Гц до 16691 Гц с шагом изменения 0,1%. Максимальное изменение частоты составило 0,9%. Результаты

оценок позволяют сделать вывод, что разработанный численный метод хорошо оценивает частоты и более чувствителен, чем быстрое преобразование Фурье (рис. 4).

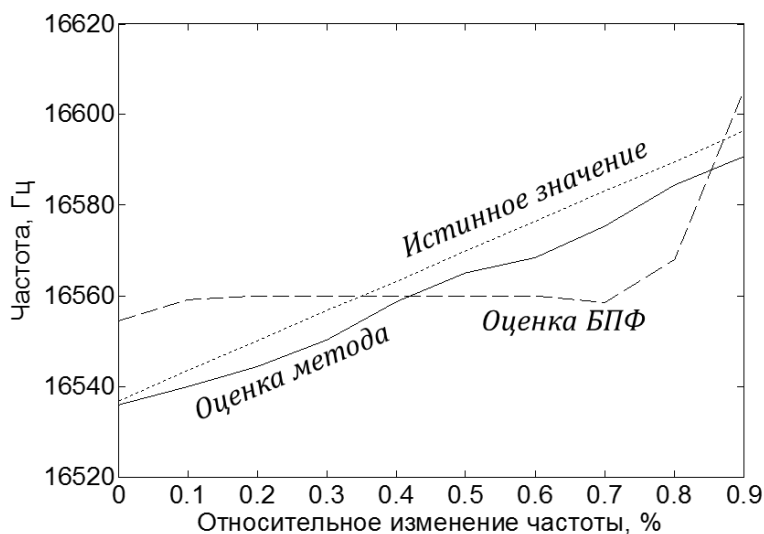


Рисунок 4 – Результаты оценки изменения частоты 16542 Гц в реальном сигнале на 0,9% разработанным численным методом (сплошная линия) и с помощью БПФ (штриховая линия). Пунктирная линия – искомое значение частоты.

Результаты моделирования разрушения сварного шва «разделительная мембрана – корпус» показали, что ожидаемое изменение большинства частот в данном случае составит 0,3-1,1%. Этим фактом может быть объяснено малоразличимое отличие спектров сигнала преобразователя, полученных с помощью БПФ, в опыте с дефектом сварного шва. Применение к анализу данного выходного сигнала предложенного численного метода выявило наличие изменения трех частот: 17643 Гц, 26878 Гц и 45440 Гц (таблица 2).

Таблица 2 – Оценки изменения частот в сигнале до и после разрыва сварного шва, вычисленные разработанным численным методом

Значение частоты до возникновения дефекта	Значение частоты после возникновения дефекта	Относительное изменение (в %)
17643 Гц	17525 Гц	0,67 %
26878 Гц	26753 Гц	0,46 %
45440 Гц	45275 Гц	0,36 %

Таким образом, на основе анализа экспериментальных данных обоснована адекватность результатов моделирования и эффективность предложенного численного метода. Показано, что предложенный численный метод хорошо оценивает частоты в реальном сигнале и более чувствителен к их изменению, чем обычное быстрое преобразование Фурье.

**В заключении** кратко подведены итоги работы и сделан вывод о возможности использования результатов исследования для оценки и/или диагностики технического состояния преобразователей давления и в других областях, также определены **направления дальнейшего развития исследований**, а именно: исследование влияния различных теплофизических параметров технологического процесса (давление, температура) на частотные характеристики; установление связи между

неисправностями датчика давления и его метрологическими характеристиками; моделирование и экспериментальное исследование преобразователей давления, работающих на различных физических принципах (емкостные, пьезорезисторные и другие); исследование возможности использования технологических шумов для определения изменения частотного спектра выходного сигнала преобразователя; классификация неисправностей преобразователя давления и определение признаков для каждой из них на основе разработанного метода оценки частот; создание алгоритмов обработки информации, в том числе для электронного блока обработки измерительной информации датчиков давления; разработка и исследование различных новых конструкций преобразователя давления с потенциальной возможностью самодиагностики и/или метрологического самоконтроля.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Разработана система компьютерного моделирования преобразователя давления, включающая в себя создание геометрических моделей отдельных деталей конструкции преобразователя, объединение их посредством связей в единый объект, построение конечно-элементной сетки и получение на основе расчетов оценок частот собственных колебаний конструкции преобразователя. Данная система применима для моделирования различных объектов, дефекты и неисправности которых влияют на их частотные характеристики.

2. Теоретически и экспериментально установлено, что частоты собственных колебаний преобразователя связаны с параметрами его конструкции и могут служить в качестве признаков его технического состояния. Дефекты и неисправности конструкции оказывают влияние на АЧХ преобразователя, но большинство дефектов вызывают относительное изменение частот в пределах 0,5-1,5%, что требует использования точных методов спектрального анализа при исследовании реальных сигналов.

3. Предложены и реализованы способы увеличения точности оценки частот в выходном сигнале преобразователя давления, что достигается за счет предварительной обработки сигнала, выбора оптимального значения частоты дискретизации и учета отношения сигнал/шум анализируемого отрезка сигнала при вычислении итоговой оценки. Разработан численный метод оценки частот в выходном сигнале преобразователя давления, который позволяет оценить значения частот в сигнале с точностью не менее 0,5%.

4. Разработаны и зарегистрированы программы для ЭВМ, включающие в себя программные модули для регистрации и обработки электрических сигналов первичных измерительных преобразователей давления, модули для оценки частот в выходном сигнале преобразователей давления и вспомогательные программы для вычисления необходимых параметров метода оценки частот в выходном сигнале преобразователей.

5. Обработка экспериментальных данных и расчеты с тестовым сигналом показали эффективность разработанного численного метода для оценки изменения частот вследствие влияния внешних факторов и его большую чувствительность по сравнению с быстрым преобразованием Фурье. Относительное изменение частот в

случае воздействия давлением, превышающем предельно допустимое значение, составило от 1,8% до 6,8%, в случае разрыва сварного шва «разделительная мембрана – корпус» на 15% изменение составило от 0,36% до 0,67%.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. Бушуев, О.Ю. Экспериментальная оценка динамических характеристик тензопреобразователей давления / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов, А.Л. Шестаков // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. «Приборостроение». - 2011. - №1. - С. 88-97.
2. Bushuev, O. Choosing an optimal sampling rate to improve the performance of signal analysis by Prony's method / O.Yu. Bushuev, O.L. Ibryaeva // 35th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Czech Republic. – 2012. – P. 634-639 (SCOPUS).
3. Бушуев, О.Ю. Применение метода Прони для анализа выходных сигналов преобразователей давления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – №23 (282). – С. 219-221.
4. Бушуев, О.Ю. Экспериментальное исследование возможности диагностики состояния тензометрического преобразователя давления на основе анализа его выходного сигнала / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2012. №35(294). - С. 65-68.
5. Бушуев, О.Ю. Моделирование влияния дефектов мембраны тензопреобразователя давления на его частотные характеристики / О.Ю. Бушуев, И.И. Григорьев, Е.С. Коровченко, А.С. Семенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – №2. – С. 74-81.
6. Бушуев, О.Ю. Анализ возможных неисправностей, источников погрешности и выхода из строя тензопреобразователя давления // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». - 2013. - №4. - С. 118-122.

### **Программы для ЭВМ и патенты**

7. Способ и устройство диагностики технологического устройства с использованием сигнала датчика технологического параметра: пат. 2444039 Рос. Федерация: МПК G05B 11/32 / А.С. Семенов, А.Л. Шестаков, О.Л. Ибряева, О.Ю. Бушуев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ЮУрГУ». – №2010135603/08; заявл. 25.08.10; опубл. 27.02.2012, Бюл. №6. – 10 с., 2 ил.
8. Способ определения динамических характеристик тензометрического преобразователя давления (варианты): пат. 2466368 Рос. Федерация: МПК G01L27/00 / Семенов А.С., Бушуев О.Ю.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ЮУрГУ». – №2011113018/28; заявл. 04.04.2011; опубл. 10.11.2012, Бюл. №31. – 13 с., 8 ил.
9. Датчик давления с разделительной диафрагмой с функцией метрологического самоконтроля: пат 145163 Рос. Федерация: МПК G01L9/00 / А.С. Семенов, В.В. Синицин, О.Ю. Бушуев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ (НИУ)». – №2014102137/28; заявл. 22.01.2014; опубл. 10.09.2014, Бюл. №25 – 2 с., 1 ил.
10. Программный модуль для регистрации и обработки электрических сигналов первичных измерительных преобразователей давления: программа для ЭВМ

№2012618476 / О.Ю. Бушуев, С.М. Алдакушев; правообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). Зарегистрировано 19.09.2012.

11. Программный модуль для автоматизации исследований амплитудно-частотной характеристики первичных измерительных преобразователей давления: программа для ЭВМ №2012618475 / О.Ю. Бушуев, Е.С. Коровченко; правообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). Зарегистрировано 19.09.2012.

12. Программа для оценивания параметров сигнала на основе метода Прони, модифицированного для улучшения оценок: программа для ЭВМ №2014616698 / О.Ю. Бушуев; правообладатель ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ). Зарегистрировано 02.07.2014.

#### **Публикации в других изданиях**

13. Бушуев, О.Ю. Исследование статистических характеристик сигнала двухмембранного тензопреобразователя давления // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – С. 7-9.

14. Бушуев, О.Ю. Модель выходного сигнала тензопреобразователя давления / О.Ю. Бушуев, Д.О. Андреев // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С. 7-9.

15. Бушуев, О.Ю. Автоматизация обработки данных при разработке лабораторного макета самодиагностирующегося датчика давления // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 94-97.

16. Бушуев, О.Ю. Исследование возможности диагностики состояния тензометрического преобразователя давления на основе анализа его выходного сигнала // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения и информатики: сборник трудов по материалам XIV международной научно-практической конференции (Сочи). – М.: МГУПИ, 2011. – С. 27-32.

17. Bushuev, O.Yu. A Pressure Transducer Signal Analysis By Prony's Method // International Conference on Wavelets and Applications (St. Petersburg). – 2012. – P. 15-17.

Подписано в печать 12.01.2016 г. Усл.печ.л. 1,0.

Формат 60x84 1/16. Тираж 150. Заказ 143

Отпечатано в типографии «Сити Принт»

ИП Мякотин И.В.

454080, г. Челябинск, ул. Энгельса, 61-а