

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ МЕМБРАНЫ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ НА ЕГО ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ\*

*О.Ю. Бушуев, И.И. Григорьев, Е.С. Коровченко, А.С. Семенов*

В статье рассматривается влияние дефектов мембраны тензопреобразователя давления на его частотные характеристики. Исследование проводилось методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS. В качестве дефектов мембраны рассмотрены типичные причины неисправностей и отказов датчиков давления: изменение геометрии мембраны (утончение в результате коррозии, пластические и остаточные деформации); налипание инородных тел; изменение модуля упругости мембраны. Показано, что в зависимости от типа изменений в конструкции происходит изменение форм и частот собственных колебаний. Изменение частот, как правило, находится в пределах от 0,1 до 4 %. Результаты исследования могут быть использованы при разработке методов диагностики технического состояния тензопреобразователя давления.

*Ключевые слова:* метод конечных элементов, тензопреобразователи давления, собственные частоты, диагностика технического состояния, диагностика неисправностей.

### **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 [1]. В соответствии с ГОСТ Р 8.673-2009 [2] неотъемлемой функцией интеллектуального датчика является тот или иной способ или алгоритм метрологического самоконтроля.

В ряде случаев, когда реализация метрологического самоконтроля затруднена, в интеллектуальном датчике необходимо обеспечить возможность оценки и/или диагностики его технического состояния, важной для принятия решения об использовании данного устройства в технологическом процессе. Кроме того, диагностика технического состояния или диагностика неисправностей может являться частью метрологического самоконтроля или самоаттестации [3]. Так или иначе, необходимым шагом к обеспечению самодиагностики и/или самоконтроля является исследование вектора параметров, по которому можно судить о состоянии сенсора, и разработка алгоритмов, позволяющих контролировать данные параметры и принимать решение в случае их отклонения от опорных значений.

В рамках данного исследования рассматривается способ реализации диагностики технического состояния тензопреобразователя давления, основанный на контроле его частотной характеристики. Преобразователь давления представляет собой электромеханическую конструкцию, неисправности (дефекты) которой оказывают влияние на его частотные характеристики. Следовательно, анализ частотной характеристики дает возможность обнаружения этих дефектов [4].

Цель данной работы – исследовать влияние дефектов мембраны тензопреобразователя давления на его частотные характеристики путем моделирования конструкции преобразователя методом конечных элементов. В качестве дефектов мембраны рассмотрены следующие типичные причины неисправностей и отказов датчиков давления: изменение геометрии мембраны (утончение в результате коррозии, пластические и остаточные деформации); налипание инородных тел; изменение модуля упругости мембраны.

---

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.132.21.1601 «Исследование влияния внешних условий и технического состояния первичного измерительного преобразователя давления на его частотную характеристику».

### **1. Описание модели конструкции тензопреобразователя**

В рамках данного исследования был рассмотрен тензометрический преобразователь давления в корпусе 2130M2-04 ДИ (изготовитель: ООО «ИТеК ББМВ», Челябинск), предел измерений которого по паспорту составляет от 0 до 100 кПа. Моделирование осуществлялось методом конечных элементов в среде ANSYS. Метод конечных элементов является одним из основных инструментов, применяемых для моделирования датчиков и их элементов [5–7], в том числе для разработки способов диагностики неисправностей, например, в [8–9].

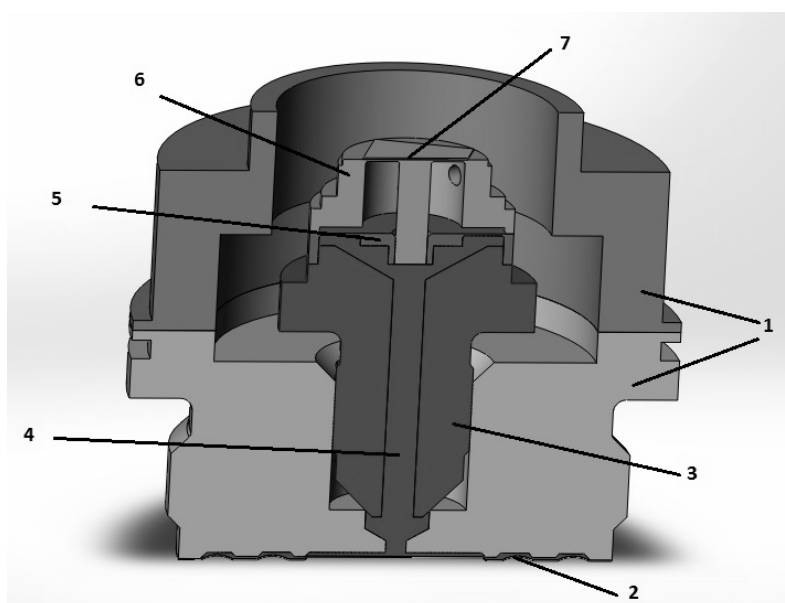
В данном исследовании для реализации метода использовался пакет программ ANSYS, в частности набор инструментов Modal analysis, предназначенный для анализа свободных механических колебаний с целью определения собственных частот и форм колебаний конструкции. Моделирование преобразователя давления состояло из нескольких этапов.

Первый этап моделирования – построение объемной геометрической модели конструкции преобразователя. Второй этап – создание исследования Modal analysis в ANSYS. Завершающим этапом моделирования является непосредственное проведение расчетов и получение результатов.

Объемная модель конструкции преобразователя была разработана в пакете SolidWorks. Предварительно были созданы отдельные элементы конструкции датчика, а затем с помощью сопряжений они были объединены в сборку.

Конструкция датчика (рис. 1) состоит из нескольких частей. Защитный корпус (1) является основанием для крепления разделительной мембраны (2). Корпус самого преобразователя (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). Жидкость передает измеряемое давление 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).

Далее объемная геометрическая модель была экспортирована в среду пакета Ansys 14. Были заданы характеристики материалов элементов сборки. В расчете использовались справочные механические характеристики материалов. Затем были созданы контактные условия для элементов сборки и «наложена» конечно-элементная сетка. В данной модели в качестве конечных элементов применялись 10-узловые тетраэдры с параболическими гранями. 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.



**Рис. 1. Объемная геометрическая модель конструкции тензопреобразователя давления**

Последний препроцессорный шаг построения модели – это наложение граничных условий. Настоящая модель рассчитывалась в симметричной постановке, поэтому было необходимо наложить такое закрепление на плоскость симметрии, которое бы запрещало перемещение ее точек по нормали и вращение вокруг осей, отличных от нормали.

На этом препроцессорная часть модели завершена. Далее производилось собственно моделирование. Результатами являются оценки собственных частот и форм колебаний элементов конструкции преобразователя при наличии различных дефектов.

## 2. Оценка частот собственных колебаний конструкции преобразователя

После разработки модели тензометрического преобразователя давления, максимально приближенного к реальной конструкции, были произведены численные расчеты в программном комплексе ANSYS. В результате были получены оценки для 18 мод колебаний конструкции тензопреобразователя, каждой из которых соответствует определенная частота и форма колебаний. Программа позволяет записать не только значение частоты, но также указать, какое относительное перемещение точек конструкции соответствует данному колебанию, и какой элемент испытывает наибольшую деформацию. На рис. 2 представлен спектр полученных частот.

Наибольшую относительную амплитуду колебаний имеют моды со следующими частотами: 14788, 14846 Гц (соответствуют колебаниям измерительной системы преобразователя как консольной балки), 26854, 26904, 41307, 41332, 51282 Гц, (соответствуют совместным колебаниям измерительной системы и нижней части корпуса), 29566, 33067, 42698, 55419, 55463 Гц (соответствуют колебаниям жидкости).

Параметры модели, связанные со свойствами материала (плотность, модуль упругости), существенно влияют на расчетные оценки собственных частот. Для оценки данного влияния были проведены расчеты с различными значениями модуля упругости разделительной и измерительной мембран и получены следующие результаты.

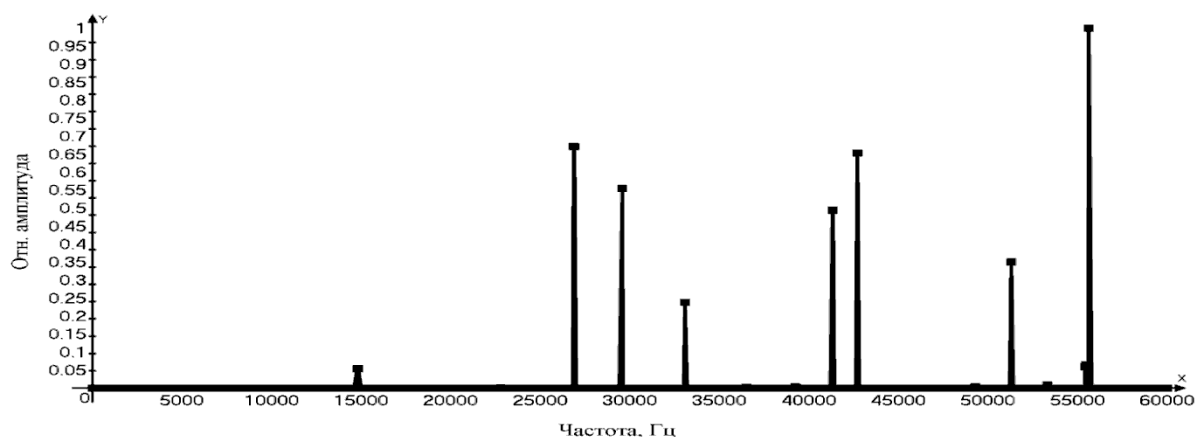


Рис. 2. Спектр частот, полученный в результате расчетов

При уменьшении или увеличении модуля упругости разделительной мембраны в два раза изменение частоты либо не происходит (для колебаний верхней части корпуса или жидкости), либо происходит незначительное изменение (менее 0,1 % для колебаний нижней части корпуса и совместных колебаний жидкости, измерительной системы и мембраны). Наибольшее изменение частот затрагивает моды с частотами 29566, 41307 и 51282 Гц и не превышает 0,4 % даже при изменении модуля упругости в 8 раз.

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 с частотами 29566, 41307 и 51282 Гц, 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. Оценка влияния дефектов мембраны преобразователя на его собственные частоты преобразователя**

#### *Оценка влияния на собственные частоты изменения толщины разделительной мембраны*

Изменение толщины мембраны, например, ее уменьшение вследствие коррозии, приводит к изменению чувствительности датчика и его собственных частот. Уменьшение толщины мембраны будет тем сильнее сказываться на метрологических характеристиках, чем ниже диапазон измеряемого давления. Так, при уменьшении толщины мембраны на 1 мкм, погрешность измерения может возрасти на 0,1–0,3 % и более.

Опорным значением толщины разделительной мембраны была принята толщина 0,1 мм. Изменение толщины было произведено в пределах от +0,05 до –0,05 мм. Были произведены расчеты при толщине мембраны 0,15; 0,1; 0,09; 0,08; 0,07; 0,05 мм.

В результате было установлено, что при изменении толщины мембраны меняются частоты колебаний, в которых принимает участие нижняя часть корпуса, включающая разделительную мембрану. Такие колебания соответствуют модам с частотами 26854, 36511, 41307, 51282, 55419 Гц. При изменении толщины на 10 %, изменение частоты составляет от 0,01 до 0,05 % (в абсолютных единицах – от 5 до 23 Гц). При изменении толщины в два раза, максимальное изменение частоты составило 0,28 % (в абсолютных единицах – 115 Гц на частоте 41332 Гц).

#### *Оценка влияния на собственные частоты налипания инородных тел на разделительную мембрану*

Моделируемая ситуация соответствует изменению веса отдельных элементов мембраны, что может быть вызвано, например, налипанием инородных тел на разделительную мембрану или ее локальной коррозией. В лабораторных условиях для экспериментальной проверки результатов моделирования проще имитировать налипание инородных тел. Моделирование производилось с помощью присоединения компонентов различного вида к мембране датчика.

Влияние тонкого слоя (с плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup>, рис. 3, а) на значения собственных частот незначительно, что вызвано малыми размерами и массой слоя. Максимальное изменение частоты происходит на моде с частотой 51282 (13 Гц), которая соответствует совместному колебанию измерительной системы, жидкости и нижней части корпуса.

Также моделировалось налипание инородного тела шарообразной формы на разделительную мембрану (см. рис. 3, б). На поверхность разделительной мембраны налипал шарик диаметром 8, 6 и 4 мм и массой соответственно 0,04; 0,136; 0,32 г. Масса разделительной мембраны в расчетах полагалась 0,65 г.



**Рис. 3. Конструкция преобразователя с дополнительным слоем (а) и с дополнительным телом шарообразной формы (б) на разделительной мембране**

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 с частотами 14788, 14846 и 22790 Гц). 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 ( $\Delta=30$ ), чем его масса ( $\Delta=5$ ).

Ко второй группе относится большинство рассчитанных колебаний. Например, частоты, соответствующие совместным колебаниям измерительной системы и нижней крышки преобразователя (моды с частотами 26854 и 26904 Гц), изменяются за счет добавления дополнительного тела, колебания которого участвуют в общем колебании системы. В данном случае размеры и масса груза имеют значение.

В таблице представлены частоты (Гц) колебаний, в которых принимает участие шарообразное тело до и после присоединения. В данную таблицу вошли преимущественно совместные колебания измерительной системы, нижней части корпуса и жидкости. Вследствие влияния дополнительного тела частоты увеличиваются на значение от 87 Гц до 3,7 кГц (или от 0,16 до 12,7 %). Интересно отметить, что добавление груза к разделительной мембране по-разному влияет на «двойные частоты», изменение которых может существенно отличаться друг от друга.

Частоты, соответствующие колебаниям жидкости, изменяются в зависимости от массы прикрепленного тела. Причем при массе тела, составляющей 6 % массы мембраны (0,04 г против 0,65 г), частоты колебаний жидкости уменьшаются. Уменьшение может достигать 2,5 %. При массе тела превышающей 20 % массы мембраны (0,136 г против 0,65 г), частоты увеличиваются.

Третьей группой колебаний являются колебания самого прикрепленного тела. Для шарика диаметром 4 мм такие колебания имеют частоты 45905 Гц (отн. норм. амплитуда 0,94) и 46349 Гц (отн. норм. амплитуда 1). Для шарика диаметром 6 мм – 25653 Гц (0,86), 25753 Гц (0,85), 27577 Гц (0,03), 27665 Гц (0,05) и 43744 Гц (0,09). Для шарика диаметром 8 мм – 21946 Гц (0,0007), 22092 Гц (0,002), 27125 Гц (0,61), 41426 Гц (0,59), 52974 Гц (0,86) и 53721 Гц (0,06).

Частоты (Гц) колебаний, в которых принимает участие шарообразное тело, до и после присоединения

Номер моды в опорном случае	Опорная конструкция		Конструкция с присоединенным шаром диаметра 8 мм		Абс. разность значений, Гц	Отн. разность значений, %
	Частота, Гц	Отн. норм. амплитуда	Частота, Гц	Отн. норм. амплитуда		
4	26854	0,672	27183	0,588	329	1,2
5	26904	0,671	29454	0,784	2550	9,5
6	29566	0,555	33282	0,319	3716	12,6
8	36511	0,003	36680	0,034	169	0,46
10	41307	0,495	41442	0,588	135	0,33
11	41332	0,494	42984	0,931	1652	4
14	51282	0,35	54322	0,005	3040	5,9
15	53302	0,009	54379	0,022	1077	2
16	55419	0,06	55506	1	87	0,16
17	55463	0,065	55592	0,002	129	0,23

*Оценка влияния на собственные частоты пластической деформации разделительной мембраны*

С течением времени, а также в результате превышения давления и гидроударов металл подвергается пластической деформации. В ходе моделирования имитировалась подача давления, после которого разделительная мембрана подвергалась деформации. С помощью ANSYS полученная геометрия конвертировалась в среду SolidWorks. Производилось конструирование нового датчика с уже деформированной мембраной. Далее проводился расчет собственных частот для нового датчика. Отличие нормальной и деформированной мембраны показаны на рис. 4.

Было осуществлено 3 исследования:

а) мембрана деформировалась на 0,55 мм по вертикальной оси (после воздействия избыточным давлением 3 МПа);

б) мембрана деформировалась на 0,33 мм (после воздействия избыточным давлением 2 МПа);

в) мембрана деформировалась на 0,19 мм (после воздействия избыточным давлением 1 МПа).

Следует отметить, что практически все частоты, соответствующие колебаниям измерительной системы, корпуса или крышки преобразователя, увеличиваются (см. рис. 5). Изменение частоты достигает 3–4 % (от 117 до 1823 Гц). При деформации 0,19 мм наибольшие изменения составляют 1 и 1,2 кГц и наблюдаются на частотах 51282 и 41307 Гц соответственно.



Рис. 4. Нормальная (а) и деформированная (б) разделительная мембрана

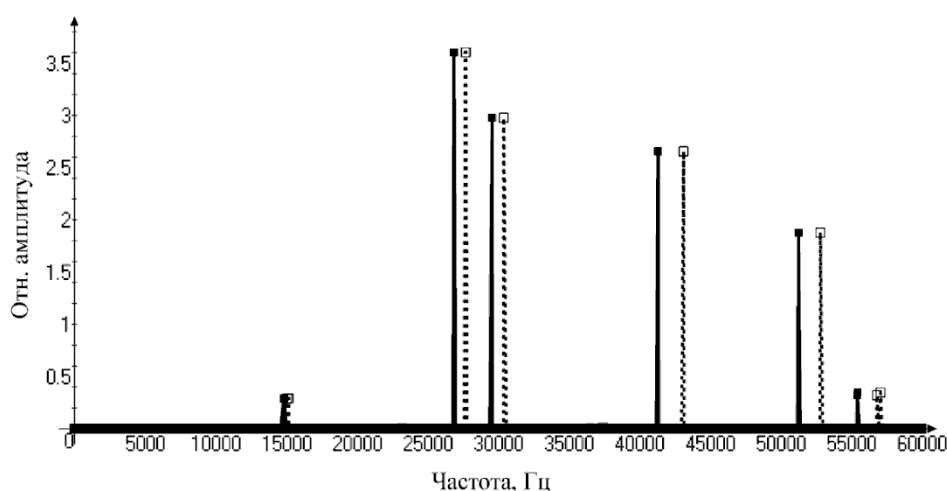


Рис. 5. Частоты тензопреобразователя, соответствующие колебаниям измерительной системы, корпуса или крышки преобразователя. Сплошная линия – мембрана без деформации, штриховая – деформация мембраны 0,55 мм

Колебания, соответствующие модам с частотами 14788, 14846, 22790, 26854, 26904 и 51282 Гц, практически не изменяют формы, но частота колебаний увеличивается с ростом деформации мембраны. Форма колебания на моде с частотой 36511 Гц изменяется в зависимости от деформации, что приводит также к изменению частоты. Двойные колебания на модах с частотами 41307, 41332 Гц и 55419 Гц, 55463 Гц остаются двойными при деформации 0,55 мм, при меньшей деформации им соответствует одна мода.

Наибольшее изменение испытывают колебания жидкости, которые существенно изменяются как по форме, так и по значению частоты. Похожие по форме колебания могут отличаться по частоте на 4 кГц. При этом может измениться порядок следования частот по возрастанию, что приводит к необходимости внимательно изучать форму колебаний и не позволяет однозначно делать вывод об изменении той или иной частоты в спектре, ограничиваясь информацией только о значениях частот.

## Выводы

В данной работе описаны результаты моделирования преобразователя давления методом конечных элементов в ANSYS. Приведены оценки собственных частот преобразователя и проанализировано влияние на них изменения параметров мембраны (дефектов).

Установлено, что изменение толщины мембраны приводит к изменению частоты колебаний, в которых принимает участие нижняя часть корпуса, включающая разделительную мембрану. Максимальное изменение частоты при уменьшении толщины мембраны в два раза составило 0,28 % (в абсолютных единицах – 115 Гц на частоте 41332 Гц).

При налипании тела с массой, составляющей 20 % массы мембраны, частоты изменяются на значение до 12,7 %, при этом изменение претерпевает большинство частот. Пластическая деформация мембраны приводит к увеличению частот, изменение достигает 3–4 %.

Проведенное моделирование позволяет заключить, что собственные частоты преобразователя связаны с параметрами его конструкции и могут служить в качестве контролируемых признаков. В частотном спектре можно выделить частоты, связанные с мембраной. Разным дефектам мембраны соответствует разное изменение частот колебаний.

Изменения частот имеют малое значение, как правило, не превышающее 1 %. Вследствие этого при разработке методики диагностики необходимо разрабатывать алгоритмы оценки частот, позволяющие оценивать частоты с точностью не меньше 0,5 %. Также требуется проведение экспериментальных исследований влияния неисправностей на спектр выходного сигнала.

## Литература

1. Тайманов, Р.Е. Метрологический самоконтроль датчиков / Р.Е. Тайманов, К.В. Сапожникова // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 58–66.
2. ГОСТ Р 8.673-2009 ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.
3. Henry, M.P. The Self-Validating Sensor: Rationale, Definitions and Examples / M.P. Henry, D.W. Clarke // Control Engineering Practice. – 1993. – Vol. 1, no. 4. – P. 585–610.
4. Бушуев, О.Ю. Исследование динамической характеристики тензопреобразователя давления с целью диагностики его состояния / О.Ю. Бушуев, А.С. Семенов, А.О. Чернявский // Датчики и системы. – 2011. – № 4. – С. 21–24.
5. 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.
6. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Одномембранные преобразователи / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2008. – № 1. – С. 6–11.
7. Козлов, А.И. Моделирование тензопреобразователей давления на основе структур КНС. Двухмембранные преобразователи / А.И. Козлов, А.В. Пирогов, В.М. Стучебников // Датчики и системы. – 2009. – № 8. – С. 50–53.
8. Zarnik, M.S. Finite-Element Model-Based Fault Diagnosis, a Case Study of a Ceramic Pressure Sensor Structure / M.S. Zarnik, D. Belavic, F. Novak // Microelectronics Reliability. – 2007. – Vol. 47. – P. 1950–1957.
9. Feng, Z. Design and Implementation of a Self-Validating Pressure Sensor / Z. Feng, Q. Wang, K. Shida // IEEE Sensors Journal. – 2009. – Vol. 9, no. 3. – P. 207–218.

Бушуев Олег Юрьевич, аспирант, преподаватель кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), bushuev@init.susu.ac.ru

Григорьев Игорь Ильич, магистрант кафедры ЭВМ, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), igrig90@gmail.com

Коровченко Евгений Сергеевич, инженер, ОАО «ЧМЗ»; daganet.74@gmail.com

Семенов Александр Сергеевич, канд. техн. наук, вед. инж. кафедры информационно-измерительной техники, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск), 560101@rambler.ru

## SIMULATION OF THE INFLUENCE OF TENSOMETRIC PRESSURE TRANSDUCER DIAPHRAGM DEFECTS ON ITS FREQUENCY RESPONSE

**O.Y. Bushuev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*bushuev@init.susu.ac.ru*

**I.I. Grigoriev**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*igrig90@gmail.com*

**Ye.S. Korovchenko**, JSC «CHMZ», Chelyabinsk, Russian Federation,  
*daganet.74@gmail.com*

**A.S. Semenov**, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,  
*560101@rambler.ru*

Tensometric pressure transducer diaphragm defects are considered. Pressure transducer structure finite-element model was developed to analyze the influence of these defects on natural frequencies of the transducer. There are considered following defects: change in the size and shape of the diaphragm (thinning as a result of corrosion, plastic and residual deformation); sticking of foreign objects; change in modulus of elasticity. It was shown that mode shapes and frequencies changes take place in dependence of the defect type. Usual change in frequency is between 0,1 and 4 %. The results of the analysis may be used for method development of pressure transducer technical condition diagnosis.

*Keywords: finite-element model, tensometric pressure transducers, natural frequencies, diagnosis of technical condition, fault diagnosis.*

### References

1. Taymanov R.Ye., Sapozhnikova K.V. Metrological Self-Check of Sensors [Metrologicheskiy Samokontrol' Datchikov]. *Datchiki i Sistemy [Sensors and Systems]*, 2011, no. 2, pp. 58–66.
2. GOST R 8.673-2009 GSI. Datchiki Intellektual'nye i Sistemy Izmeritel'nye Intellectual'nye. Osnovnye Termini i Opredeleniya. [Intellectual Sensors and Intellectual Measuring Systems. Main Terms and Definitions].
3. Henry M.P., Clarke D.W.. The Self-Validating Sensor: Rationale, Definitions and Examples. *Control Engineering Practice*, 1993, vol. 1, no. 4, pp. 585–610.
4. Bushuev O.Yu., Semenov A.S., Chernyavsky A.O. Study of Dynamical Characteristic of Tensometric Pressure Transducer for the Diagnostics of Its Condition [Issledovanie Dinamicheskoy Kharakteristiki Tenzopreobrazovatelya Davleniya s Tsel'yu Diagnostiki Ego Sostoyaniya]. *Datchiki i Sistemy [Sensors and Systems]*, 2011, no. 4, pp. 21–24.
5. Bogush M.V., Pikalev E.M. Analysis of the Transformation Function of Piezoelectric Transducer of Pressure [Analiz Funktsii Preobrazovaniya P'ezoelektricheskikh Datchikov Davleniya Metodom Konechnikh Elementov]. *Izvestiya YUFU. Tekhnocheskie Nauki*, 2008, no. 2, pp. 74–84.
6. Kozlov A.I., Pirogov A.V., Stuchebnikov V.M. Modeling SOS Structure-Based Strain Pressure Sensors. Single-Diaphragm Transducers [Modelirovanie Tenzopreobrazovatelyey Davleniya na Osnove Struktur KNS. Odnomembrannye Preobrazovateli]. *Datchiki i Sistemy [Sensors and Systems]*, 2008, no. 1, pp. 6–11.
7. Kozlov A.I., Pirogov A.V., Stuchebnikov V.M. Modeling SOS Structure-Based Strain Pressure Sensors. Two-Diaphragm Transducers [Modelirovanie Tenzopreobrazovatelyey Davleniya na Osnove Struktur KNS. Dvukhmembrannye Preobrazovateli]. *Datchiki i Sistemy [Sensors and Systems]*, 2009, no. 8, pp. 50–53.
8. Zarnik M.S., Belavic D., Novak F. Finite-Element Model-Based Fault Diagnosis, a Case Study of a Ceramic Pressure Sensor Structure. *Microelectronics Reliability*, 2007, vol. 47, pp. 1950–1957.
9. Feng Z., Wang Q., Shida K. Design and Implementation of a Self-Validating Pressure Sensor. *IEEE Sensors Journal*, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 207–218.

Поступила в редакцию 11 марта 2013 г.