

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОПЕРЕМЕЩЕНИЙ МЕМБРАНЫ ПЬЕЗОКВАРЦЕВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Таранчук А.А.¹, к. т. н., доцент,
Акулиничев А.А.², к. т. н., доцент,
Цегольник Г.Г.¹, магістрант

¹Хмельницький національний ун-т, г. Хмельницький, Україна
²Національний аерокосмічний ун-т ім. М.Е. Жуковського,
г. Харків, Україна

Введение

Частотные измерительные преобразователи неэлектрических величин на базе управляемых кварцевых резонаторов (КР) находят широкое применение в измерительной технике благодаря их высокой точности и универсальности [1]. Вместе с тем, построение измерительных преобразователей силы и приводимых к ней физических величин (давления, перемещения и др.), использующих эффект тензочувствительности КР, сопряжено с решением сложной проблемы сопряжения силовопередающего элемента с кварцевым пьезоэлементом. Широкие возможности в решении этих задач открываются при применении бесконтактного частотного управления КР путем модуляции межэлектродного зазора [2]. При этом методе частотного управления добротность колебательных систем сохраняется практически на неизменном уровне, а цепи управления не вносят дополнительные фазочастотные шумовые флуктуации в измерительный сигнал.

Постановка задачи

Известен кварцевый частотный модулятор (КЧМ), относящийся к измерительным медицинским устройствам, функцию подвижного электрода, в котором, выполняет колеблющийся пьезоэлемент (ПЭ) [3].

Данный вид КЧМ совмещает в себе использование двух видов управления: тензочувствительности кварцевого резонатора и управление им модуляцией межэлектродного зазора [4]. Принципы построения данного КЧМ проиллюстрированы на рис. 1. Под действием прикладываемого давления в плоскости пьезоэлемента возникают механические напряжения σ , вследствие чего ПЭ изменяет свои свойства,

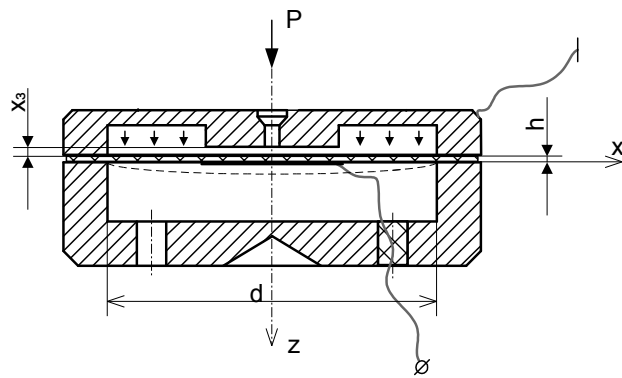


Рис. 1. Конструкция КЧМ: h - толщина ПЭ; d - контур ПЭ, свободный от заземления

а именно изменяется его резонансная частота. Это является проявлением первого механизма управления.

Второй механизм управления заключается в следующем: на резонирующую мембрану (РМ), заземленную по контуру действует распределенное воздушное давление P . Под действием давления происходит прогиб РМ и, как следствие, увеличение межэлектродного зазора x_3 , что приводит к уменьшению ёмкости межэлектродного зазора C_3 .

В работах [4,5] приведены аналитические расчёты величины прогиба РМ, а также механические напряжения в соответствии с теорией тонких пластин и оболочек Кирхгофа, рассчитанные следующим образом:

$$w(x, y) = w_0 \left(1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^2, \quad (1)$$

$$w_0(p) = p \cdot \left(h^3 \cdot \left[2 \cdot C_{11} \cdot \left(\frac{1}{a^4} + \frac{1}{b^4} \right) + \frac{4 \cdot (C_{11} + 2 \cdot C_{44})}{3 \cdot a^2 \cdot b^2} \right] \right)^{-1}, \quad (2)$$

a, b – полуоси эллипса, ограничивающего поверхность мембраны; h – толщина мембраны; C_{11}, C_{12}, C_{44} – модули упругости кварца; x, y – координаты точек мембраны,

$$\begin{cases} \sigma_x(x, y) = -2 \cdot h \cdot w_0 \cdot \left[C_{11} \cdot \left(\frac{1}{a^2} - \frac{3 \cdot x^2}{a^4} - \frac{y^2}{a^2 \cdot b^2} \right) + C_{12} \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{3 \cdot y^2}{b^4} - \frac{x^2}{a^2 \cdot b^2} \right) \right] \\ \sigma_y(x, y) = -2 \cdot h \cdot w_0 \cdot \left[C_{12} \cdot \left(\frac{1}{a^2} - \frac{3 \cdot x^2}{a^4} - \frac{y^2}{a^2 \cdot b^2} \right) + C_{11} \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{3 \cdot y^2}{b^4} - \frac{x^2}{a^2 \cdot b^2} \right) \right] \end{cases}, \quad (3)$$

На основании формул (1) - (3) для рассматриваемой конструкции КЧМ в диапазоне изменения давления от нуля до 50 кПа получена величина прогиба РМ 17,3 мкм [4] при максимальном напряжении в мембране 33,58 МПа, являющаяся меньше предельно допустимой в 2,5 раза [5].

Полученные аналитически в работах [4,5] результаты на базе соотношений (1) – (3) носят приближённый характер и не учитывают заземлённое состояние мембраны. К тому же данный метод не позволяет выполнить трёхмерные расчёты для получения более точных характеристик напряжённо-деформированного состояния РМ.

Целью работы является проведение численного моделирования напряжённо-деформированного состояния резонирующей заземлённой мембраны преобразователя для повышения точностных характеристик пьезорезонансных измерительных преобразователей давления с механическим управлением микроперемещений РМ на этапе их проектирования и эксплуатации.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния резонирующей мембраны

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния РМ круглой (эллиптической) формы, выполнено на основе системы инженерного анализа ANSYS, использующей метод конечных элементов [6].

С учётом анизотропных свойств модели заданы следующие константы: модуль упругости $E_x = 78$ ГПа, $E_y = 85,3$ ГПа, $E_z = 92,6$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0.077$ и модуль сдвига $G_{xy} = 42$ ГПа [7, 8].

Учитывая характер нагружения (прогиб мал по сравнению с толщиной пластины) и условие $d/h > 10$ используем модель для тонкой пластины. Для данной модели нормаль к срединной плоскости до изгиба остается нормально к этой плоскости и после изгиба. Поэтому деформации сдвига отсутствуют, т. е. $\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0$.

Учитывая геометрическую и силовую симметрию расчетной модели, достаточно рассмотреть сектор мембраны, ограниченный главными осями, с заданием соответствующих граничных условий: отсутствие перемещений и вращения в плоскости; плоскость симметрии $xy - u_z = 0$; плоскость симметрии $yz - u_x = 0$; $\gamma_{xy} = \gamma_{yz} = 0$. Данные допущения позволяют значительно сократить размерность решаемой задачи. Защемление свободного края пластины моделируется путем фиксации узлов, находящихся в области защемления, в плоскости xy (рис. 2).

Пластина нагружается действующим в плоскости оболочки избыточным давлением $P = 4 \cdot 10^4$ Па (300 мм рт. ст.).

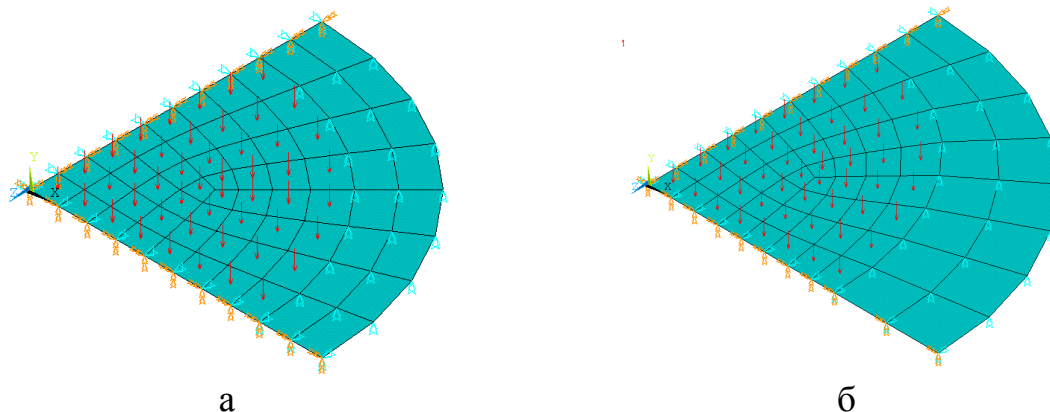


Рис. 2. Конечно-элементная модель резонирующей мембраны с визуализацией граничных условий и приложенного давления: а – круглая; б – эллиптическая

При решении данной задачи учитывается также геометрическая нелинейность – изменения цилиндрической жесткости оболочки в процессе деформирования. Это обеспечивается путем обновления (пересчета) матрицы жесткости после каждой итерации. Решение системы нелинейных уравнений находится с помощью метода Ньютона-Рафсона с автоматическим изменением шага итерации.

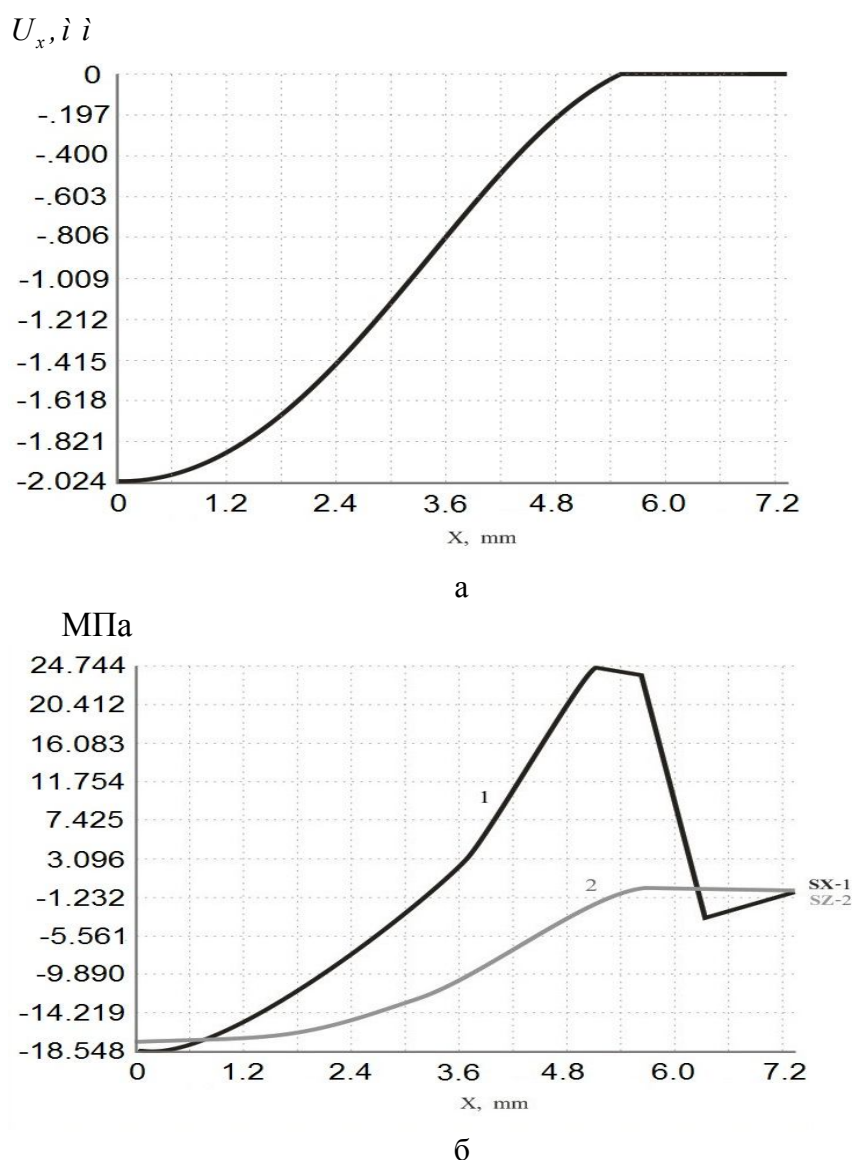
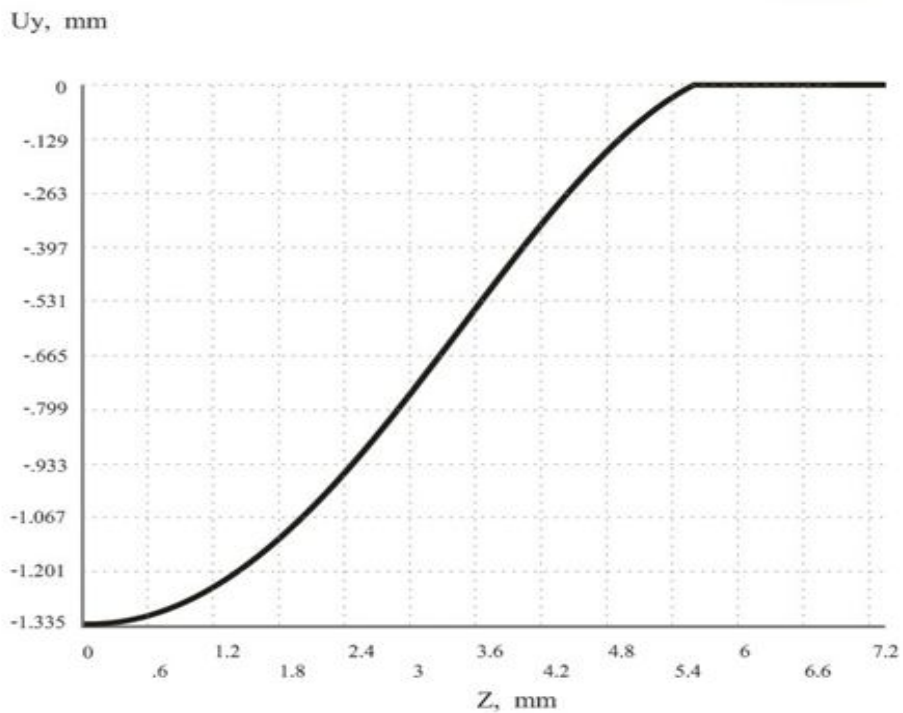


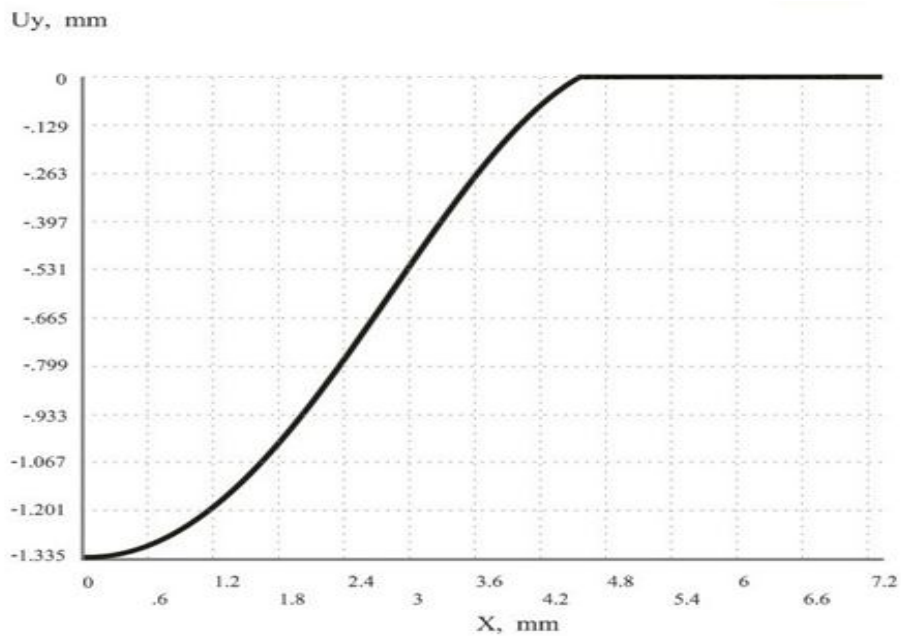
Рис. 3. Расчетные параметры круглой РМ
а – прогиб; б – напряжения σ_x (1) и σ_z (2)

В результате расчета РМ с круглым контуром защемления и параметрами $h = 169$ мкм, $d = 11$ мм получены величины прогибов u_z и нормальных напряжений σ_x , σ_z (рис. 3). Расчет параметров РМ с эллиптическим контуром защемления проводился для $a = 5,5$ мм и $b = 4,4$ мм (рис. 4).

Анализ полученных данных в ходе численного моделирования показывает, что величина хода РМ для круглого защемления составляет около 20 мкм, эллиптического – 13 мкм, а запас прочности по механическим напряжениям, возникающим в плоскости пьезоэлемента, составляет примерно 5,5.

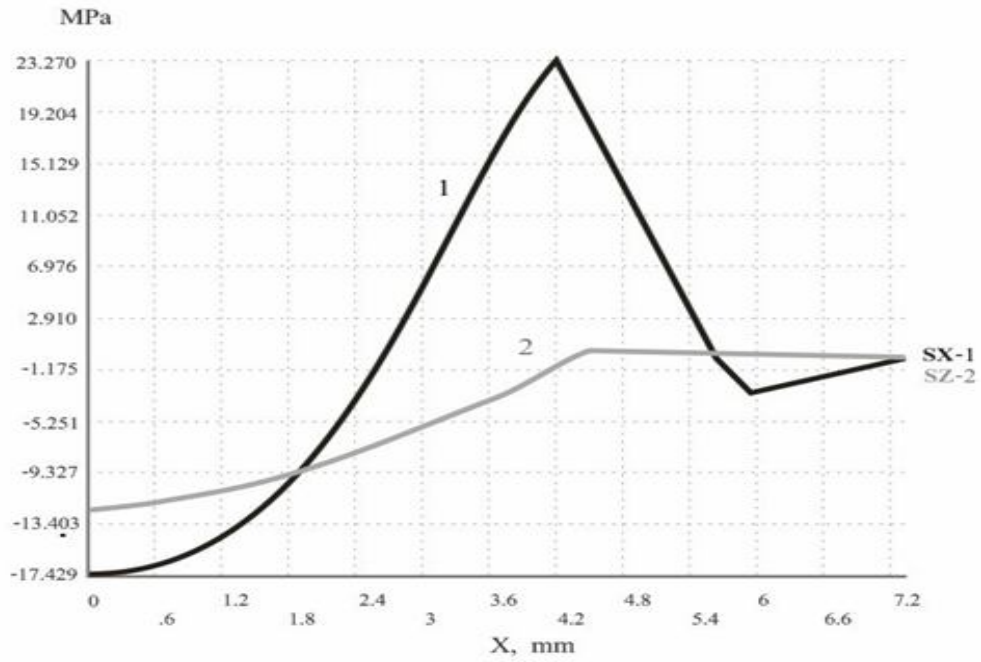


а

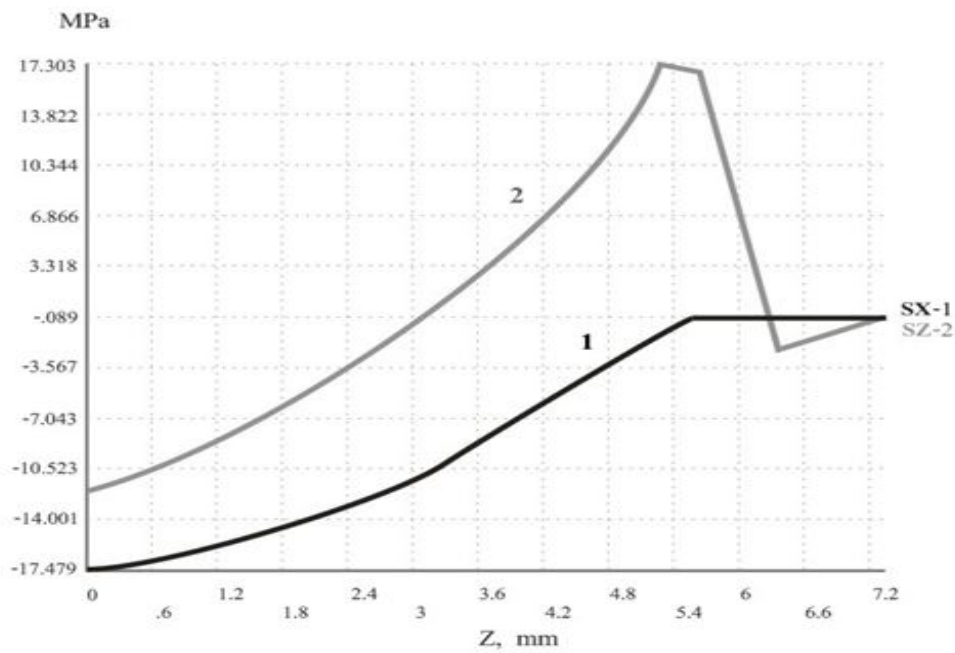


б

Рис. 4а,б. Расчетные параметры эллиптической РМ. а, б – прогиб мембраны по осям a и b эллипса соответственно



В



Г

Рис. 4в,г. Расчетные параметры эллиптической РМ. в, г - напряжения σ_x (1) и σ_z (2) по осям a и b эллипса соответственно

Выводы

Проведенное в работе тестовое численное моделирование механических напряжений σ_x и σ_y для круглых и эллиптических мембран пьезокварцевого измерительного преобразователя показало, что погрешность полученных результатов, подтверждаемых аналитически, не превышает (5-8)%.

Результаты моделирования подтвердили высокую эффективность предложенной методики на основе метода конечных элементов для выполнения высокоточных расчётов сложных конструктивных элементов пьезокварцевых измерительных преобразователей на этапе их проектирования и эксплуатации, получение аналитического решения для которых не представляется возможным.

Литература

1. Малов В. В. Пьезорезонансные датчики / В. В. Малов - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1989. - 272 с.
2. Патент № 2098783, Россия. МКИ G01L9/08, G01L9/12. Датчик давления / Ф. Ф. Колпаков, Г. Л. Хильченко, С. К. Пидченко - № 96101243; Заяв. 18.01.1996; Опубл. 10.12.1997, бюл. № 34.
3. Патент № 59936А, Україна. МКІ 7 G01L9/08, G01L9/12. Датчик тиску / Ф. Ф. Колпаков, А. А. Акулиничев, С. К. Підченко, А. А. Таранчук. – № 2002129829; Заяв. 09.12.02; Опубл. 15.09.03, бюл. № 9.
4. Акулиничев А. А. Пьезокварцевый измерительный преобразователь давления с эллиптической резонирующей мембраной / А. А. Акулиничев, Ф. Ф. Колпаков // Авиационно-космическая техника и технология // Сб. научн. тр, вып. 12, Харьков 1999. - С. 103 - 105.
5. Акулиничев А.А. Телеметрическая система сбора и передачи данных по радиоканалу ISM-диапазона // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2004. - № 1. – с. 39 - 44.
6. Руководство пользователя к пакету ANSYS 5.0. ANSYS Solutions. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ansys.com/services/documentation>. – Название с экрана.
7. Блистанов А.А. Акустические кристаллы: Справочник / А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В.В. Чкалова // Под ред. М.П. Шаскольской. - М. : Наука, 1982. - 632 с.
8. Най Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. - М. : Мир, 1967. - 385 с.

Таранчук А. А., Акулінічев А. А., Цегольник Г. Г. Моделювання мікрозміщень мембрани п'єзокварцового вимірювального перетворювача. Описано п'єзокварцовий вимірювальний перетворювач повітряного тиску, що поєднує використання двох видів управління: тензочутливості кварцового резонатора і керування імпульсною модуляцією міжелектродного зазору. Наведено метод резонуючої мембрани, при якому функцію рухомого електрода в конструкції вимірювального перетворювача виконує п'єзоелемент, що коливається. На базі методу кінцевих елементів здійснено чисельне моделювання прогину мембрани даної конструкції, виконане за допомогою прикладного пакету ANSYS. Результати моделювання, приведені в роботі, підтвердили високу ефективність запропонованої методики на основі методу кінцевих елементів для виконання високоточних розрахунків складних конструктивних елементів п'єзокварцових вимірювальних перетворювачів на етапі їх проектування та експлуатації, отримання аналітичного рішення для яких не представляється можливим.

Ключові слова: вимірювальний перетворювач, повітряний тиск, рухливий електрод, міжелектродний зазор

Таранчук А. А., Акулиничев А. А., Цегольник Г. Г. Моделирование микроперемещений мембраны пьезокварцевого измерительного преобразователя.

Описан пьезокварцевый измерительный преобразователь воздушного давления совмещающий использование двух видов управления: тензочувствительности кварцевого резонатора и управление импульсной модуляцией межэлектродного зазора. Приведен метод резонирующей мембраны, при котором функцию подвижного электрода в конструкции измерительного преобразователя выполняет колеблющийся пьезоэлемент. На базе метода конечных элементов осуществлено численное моделирование прогиба мембраны данной конструкции выполненное с помощью прикладного пакета ANSYS. Результаты моделирования, приведенные в работе, подтвердили высокую эффективность предложенной методики на основе метода конечных элементов для выполнения высокоточных расчётов сложных конструктивных элементов пьезокварцевых измерительных преобразователей на этапе их проектирования и эксплуатации, получение аналитического решения для которых не представляется возможным.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, воздушное давление, подвижный электрод, межэлектродный зазор

*A.A. Taranchuk, A.A. Akulinechev, G.G. Cegolnik. **Modeling of Micromoving of Membrane Piezoquartz The Measuring converter.** In work it is described piezoquartz the measuring converter of air pressure combines the use of two types of control: tensosensitivity of quartz resonator and management of it modulation of an interelectrode gap. Also the method of a resounding membrane at which function of a mobile electrode in a design of the measuring converter is carried out by a fluctuating piezoelement is described. On the basis a method of final elements numerical modelling a deflection of a membrane of the given design executed by means of applied package ANSYS is carried out. The results of modelling spent in work, have confirmed high efficiency of the offered technique on the basis a method of final elements for performance of high-precision calculations of difficult constructive elements piezoquartz measuring converters at a stage of their designing and operation reception of the analytical decision for which isn't obviously possible.*

Key words: measuring converter, air pressure, mobile electrode, interelectrode gap