
МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 534.121.1
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-333-341

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

А. М. Бражников*, С. Ю. Ганигин

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

*ArtemBragnicov@yandex.ru

Аннотация. Исследованы квазистатические колебания пьезоэлектрического диска с несколькими электродами с целью определения их оптимальной конфигурации при работе пьезоэлемента в составе устройства. Первым критерием оптимальности выступает величина осевых деформаций геометрического центра поверхности пьезоэлемента. Вторым критерием выбрана величина напряжения отклика, снимаемая с электрода обратной связи пьезоэлемента. Построена конечно-элементная модель пьезоэлектрического преобразователя в программном продукте Ansys Workbench. Рассчитаны значения напряжения отклика и амплитуды осевых деформаций при различных конфигурациях электродов. Проведены экспериментальные исследования напряжения отклика при работе преобразователя на частоте резонанса 1200 Гц и на частоте много ниже частоты резонанса — при 300 Гц. С помощью методов лазерной интерферометрии экспериментально исследованы значения осевой деформации. Исследование деформации проводилось при частоте 400 Гц. Результаты моделирования и экспериментов показали сходные тенденции. Расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными обусловлено отличием реальных значений пьезомодулей от справочных данных производителя. Полученные результаты позволяют сформулировать рекомендации по расположению и назначению электродов дисковых пьезоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, конечно-элементное моделирование, лазерная интерферометрия, квазистатические колебания, пьезоэлемент, деформация

Ссылка для цитирования: Бражников А. М., Ганигин С. Ю. Исследование квазистатических колебаний пьезоэлектрического диска с использованием конечно-элементного моделирования и лазерной интерферометрии // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 4. С. 333–341. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-333-341.

STUDY OF QUASI-STATIC VIBRATIONS OF A PIEZOELECTRIC DISK USING FINITE ELEMENT MODELING AND LASER INTERFEROMETRY

A. M. Brazhnikov*, S. Yu. Ganigin

Samara State Technical University, Samara, Russia

* ArtemBragnicov@yandex.ru

Abstract. Quasi-static oscillations of a piezoelectric disk with several electrodes are studied in order to determine their optimal configuration during operation of the piezoelectric element as part of a device. The first criterion of optimality is the value of axial deformations of the geometric center of the piezoelectric element surface. The second criterion is the value of the response voltage taken from the feedback electrode of the piezoelectric element. A finite element model of the piezoelectric transducer is built in the Ansys Workbench software product. The values of the response voltage and the amplitude of axial deformations are calculated for various electrode configurations. Experimental studies of the response voltage at various frequencies of the transducer are carried out: at a resonance frequency of 1200 Hz and far from the resonance frequency at 300 Hz. Using laser interferometry methods, the values of axial deformation are experimentally studied at a frequency of 400 Hz. The results of modeling and experimental studies show similar trends. The discrepancy

between the simulation results and the experimental data is due to the discrepancy between the actual values of the piezomodules and the manufacturer's reference data. The results obtained allow us to formulate recommendations on the location and purpose of the electrodes of disk piezoelectric transducers.

Keywords: piezoelectric transducer, finite element modeling, laser interferometry, quasi-static oscillations, piezoelectric element, deformation

For citation: Brazhnikov A. M., Ganigin S. Yu. Study of quasi-static vibrations of a piezoelectric disk using finite element modeling and laser interferometry. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 4. P. 333–341 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-4-333-341.

Введение. Пьезоэлектрические преобразователи широко используются в качестве датчиков и исполнительных устройств для регистрации или создания малых перемещений. Во многих устройствах, таких как расходомеры, измерители уровня жидкости, плотномеры, пьезоэлектрические преобразователи являются излучателями и приемниками ультразвуковых колебаний.

В настоящее время большинство пьезоэлектрических преобразователей имеют форму диска или кольца, основная особенность их деформации — изменение толщины в направление оси поляризации. Сложные пьезоэлектрические системы используют сборки, состоящие из нескольких простых преобразователей для увеличения амплитуды колебаний и создания сложных мод колебаний [1].

Резонансные характеристики пьезоэлектрических преобразователей зависят от их формы, размеров, материала и расположения электродов. Во многих устройствах пьезоэлектрические преобразователи работают в резонансном режиме, который достигается за счет использования внешнего механического резонатора. Собственные резонансные частоты пьезоэлементов при этом значительно превосходят частоты, на которых работает система [2].

Исследованию мод колебаний пьезоэлектрических преобразователей с распределенными электродами посвящено множество работ [3–6]. Большинство исследований направлено на теоретическое и экспериментальное исследование резонансных режимов работы пьезоэлектрических преобразователей [7–10].

Пьезоэлектрический дисковый преобразователь может использоваться в качестве привода для возбуждения резонансных колебаний в составе вибрационных сигнализаторов уровня камертонного типа. При этом колебания резонатора возбуждаются на первой гармонике, соответствующей раскачиванию лепестков в противофазе относительно оси симметрии резонатора. На рис. 1 проиллюстрированы колебания лепестков резонатора на первой гармонике (897,5 Гц) и зоны деформации мембранны (модальный анализ Ansys).

Наибольшие деформации при этом возникают в геометрическом центре мембранны в осевом направлении. Пьезоэлектрический преобразователь должен колебаться также в этом направлении для обеспечения наибольшей амплитуды колебаний лепестков и, как следствие, наибольшей чувствительности преобразователя. Конфигурация электродов на преобразователе оказывает влияние на форму его колебаний и абсолютные значения создаваемых им деформаций.

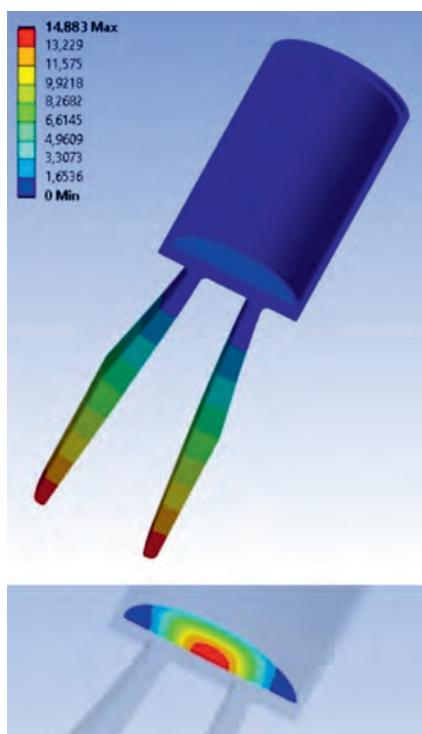


Рис. 1

Цели и задачи исследования. В настоящей работе исследуются квазистатические колебания пьезоэлектрического диска с несколькими независимыми электродами. Часть электродов используется для возбуждения колебаний преобразователя, часть — для получения напряжения

отклика, формируемого в результате прямого пьезоэлектрического эффекта, которое может использоваться для настройки колебательной системы на резонансные частоты.

Цель настоящего исследования заключается в определении оптимальной конфигурации электродов пьезоэлектрических преобразователей, использующихся в составе вибрационных сигнализаторов уровня камертона типа. Первым критерием оптимальности выступает величина осевых деформаций дискового пьезоэлемента, вторым — величина напряжения отклика, снимаемого с электрода пьезоэлемента. В результате исследования сформулированы практические рекомендации по расположению и назначению независимых электродов пьезоэлектрического дискового преобразователя, позволяющие улучшить характеристики конечного изделия.

Теория и метод моделирования. Исследуемый пьезоэлектрический преобразователь представляет собой диск диаметром 18 мм и толщиной 2 мм, выполненный из материала ЦТС-19. На поверхность диска нанесены три электрода (рис. 2; 1 — сигнальный электрод; 2 — силовой; 3 — опорный; 4 — электрод на боковой поверхности (нет в пьезокерамике ЭЛМА); сигнальный и силовой электроды могут меняться местами). Расположенный на нижней плоскости электрод считается опорным, его потенциал равен потенциальному земли измерительной схемы. Один из электродов на верхней плоскости служит для возбуждения колебаний пьезоэлемента (обратный пьезоэлектрический эффект). Второй электрод служит для измерения напряжения, возникающего при деформации пьезоэлемента (прямой пьезоэлектрический эффект).

Согласно документации производителя на пьезоэлектрический материал, пьезокерамика ЦТС-19 обладает следующими пьезомодулями: $d_{31} = 155 \cdot 10^{-12}$; $d_{33} = 360 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н. Коэффициенты электромеханической связи $K_p = 0,56$; $K_{31} = 0,29$; $K_{33} = 0,64$. Необходимо отметить, что эти цифры приведены для материала ЦТС-19, они получены путем измерения величины пьезомодулей на пьезоэлементах прямоугольного сечения, реальные значения для пьезоэлементов дисковой формы могут отличаться [11].

Конечно-элементное моделирование проводилось в программном продукте Ansys Workbench с использованием модуля расчета связных задач при гармоническом анализе, который позволяет моделировать поведение пьезоэлектрических материалов, основываясь на матрице пьезоэлектрических модулей и механических свойствах материала пьезокерамики. Этот метод широко используется для моделирования поведения анизотропных материалов с пьезоэлектрическими свойствами.

В качестве прототипа выбран материал РЗТ-5А. Матрица пьезоэлектрических модулей заменена на аналогичную для ЦТС-19. Материал электродов пьезоэлемента — серебро толщиной 10 мкм. Тип сцепления тела электрода и тела пьезоэлемента — прямое, без трения. Это позволяет определить в настройках монолитную структуру для анализа деформаций. Размер элемента расчетной сетки 0,5 мм, число элементов около 17 000.

Поскольку интерес представляют колебания изгиба в осевом направлении, закрепление производилось по окружности нижнего основания цилиндрической формы пьезоэлемента (фиксация по всем осям).

Выполнялся гармонический анализ. Вычисления производились только для типовой рабочей частоты пьезоэлемента в составе прибора 1200 Гц. Амплитуда напряжения возбуждения составляла 15 В.

Во время моделирования питающее напряжение было приложено к различным электродам пьезоэлемента, кроме того, оценивалось влияние электрода на боковой поверхности элемента на осевую деформацию центра нижней поверхности пьезоэлектрического диска.

В первом случае напряжение возбуждения прикладывалось к электроду 2, сигнал снимался с электрода 1, электрод 3 имел нулевой потенциал, электрод 4 не подключен. Напряжение на электроде обратной связи 1 составляет 4,176 В (рис. 3, б), напряжение возбуждения на электро-

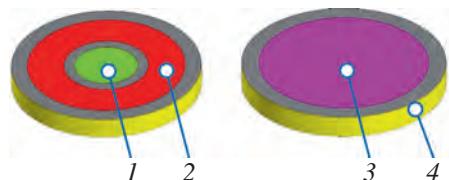


Рис. 2

де 2 — 15,0 В (рис. 3, *в*). Деформация пьезоэлемента в ключевой точке в осевом направлении составила 20 нм (рис. 3, *а*). На рис. 3: нижний электрод-диск — GND, верхний электрод-кольцо — возбуждение, верхний электрод-диск — обратная связь, электрод на боковой поверхности не подключен.

Во втором случае напряжение возбуждения прикладывалось к электроду 1, сигнал снимался с электрода 2, электрод 3 имеет нулевой потенциал, электрод 4 не подключен. Напряжение на электроде обратной связи составило 1,21. Деформация пьезоэлемента в ключевой точке составила 5 нм.

Аналогичное моделирование выполнено для случаев, когда в качестве опорного используется электрод, расположенный на боковой поверхности, а также электрод на нижней поверхности в сочетании с боковым электродом. Результаты моделирования представлены в табл. 1.

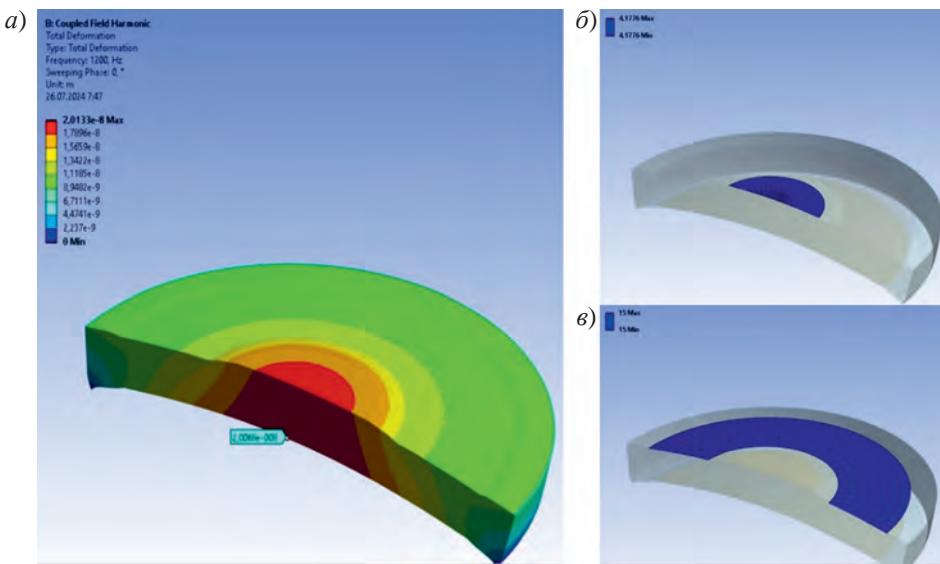
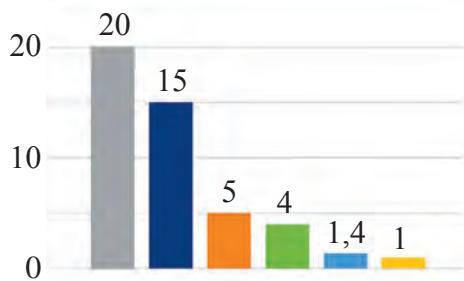


Рис. 3

 $\Delta X, \text{ нм}$ 

- Возбуждение — 2, Сигнал — 1, Опорный — 3
- Возбуждение — 2, Сигнал — 1, Опорный — 3, 4
- Возбуждение — 1, Сигнал — 2, Опорный — 3
- Возбуждение — 1, Сигнал — 2, Опорный — 3, 4
- Возбуждение — 2, Сигнал — 1, Опорный — 4
- Возбуждение — 1, Сигнал — 2, Опорный — 4

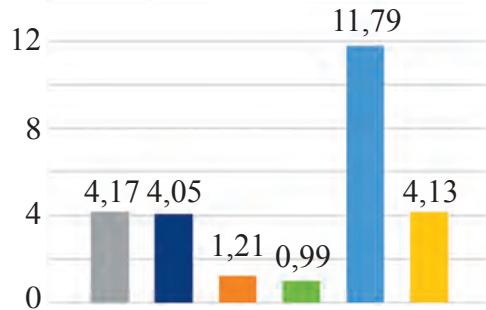
 $u, \text{ В}$ 

Рис. 4

Таблица 1

| Опорный электрод | Амплитудное значение деформации, нм | | Напряжение отклика, В | |
|------------------|-------------------------------------|------------|-----------------------|------------|
| | электрод 1 | электрод 2 | электрод 1 | электрод 2 |
| 3 | 5 | 20 | 4,17 | 1,21 |
| 4 | 1 | 1,4 | 11,79 | 4,13 |
| 3 и 4 | 4 | 15 | 4,05 | 0,99 |

Анализ данных таблицы позволяет сказать, что при подаче напряжения возбуждения на электрод 2 удается добиться большей деформации в осевом направлении (рис. 4). В этом случае также повышается напряжение обратной связи. При конфигурации, когда используется опорный электрод 4 (3 не подключен), удается добиться величины напряжения обратной связи более 11 В при напряжении возбуждения 15 В.

Интересно, что при использовании электродов 3 и 4 в качестве опорных результаты ухудшаются как по величине напряжения обратной связи, так и по деформациям. Это связано с тем, что колебания происходят как бы в противофазе. Деформации накладываются друг на друга, и происходит частичная компенсация.

Эксперимент. Для проверки результатов моделирования проведены эксперименты по измерению напряжения отклика пьезоэлемента в составе чувствительного элемента сигнализатора уровня (сборка „пьезоэлемент–камертон“). Использовался камертон с напайным пьезоэлементом, так как он показывает наилучшие характеристики резонанса. Для оценки величины отклика используются генератор сигналов RIGOL DG4202 и осциллограф АЛЬФАТРЕК С7-354. На генераторе формируется напряжение возбуждения амплитудой 15 В. Осциллографом снимается сигнал с электрода пьезоэлемента.

Эксперимент выполнен для двух конфигураций электродов возбуждения.

I. Напряжение возбуждения прикладывалось к электроду 1, сигнал снимался с 2, опорный электрод 3. На частоте 300 Гц, которая выбрана опорной, намного ниже частоты резонанса, амплитуда напряжения на электроде 1 составила 2,4 В. На частоте резонанса 1290,2 Гц амплитуда напряжения отклика составила 11,2 В.

II. Напряжение прикладывалось к электроду 2, сигнал снимался с 1, опорный электрод 3. На частоте 300 Гц амплитуда напряжения на электроде 2 составила 1,5 В. На частоте резонанса 1290,5 Гц напряжение поднялось до 4,3 В.

Поскольку амплитуда колебаний поверхности пьезоэлемента составляет всего несколько нанометров, для ее измерения широко используются методы оптической интерферометрии [12–16]. Для решения задачи был сконструирован интерферометр Майкельсона (рис. 5).

Базой интерферометра служит алюминиевая пластина 1 длиной 300 мм, шириной 180 мм и толщиной 15 мм. На ней расположен лазерный излучатель 2 с длиной волны 632 нм. Делительная призма 3 разделяет фокусированный лазерный луч, формируя два плеча интерферометра. Первый луч отражается от неподвижного 4, а второй — от подвижного зеркала 5. Подвижное зеркало расположено на сборке пьезоэлементов 6. Лучи, отраженные от опорного и подвижного зеркал, интерферируют и при помощи направляющего зеркала 7 направляются на фотодетектор 8.

Получаемая на выходе интерферометра картина направляется в PIN-фотодиод OSRAM SFH203P, подключенный к усилителю, который подключен к осциллографу АЛЬФАТРЕК С7-354.

Подвижное зеркало закреплено на паре пьезоэлементов (рис. 6). Первый пьезоэлемент крепится к пластиковой оправке 1. Он является биморфной сборкой из пьезо-

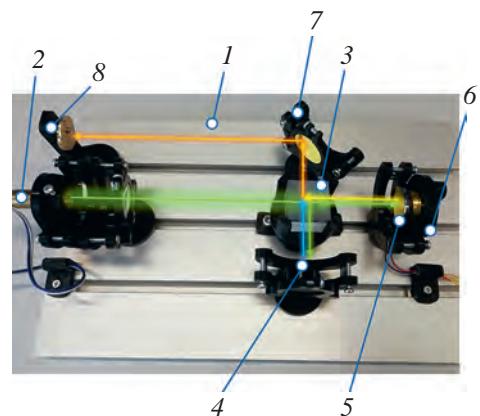


Рис. 5



Рис. 6

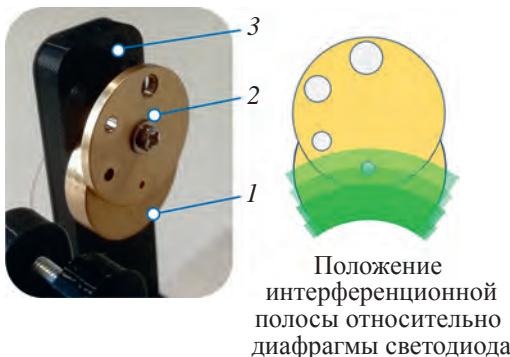


Рис. 7

Отверстия могут совмещаться с оптической осью фотодиода — таким образом реализован механизм изменения апертуры диафрагмы. Это позволяет контролировать количество света, попадающего на фотодиод. Диаметр отверстия выбирается исходя из расстояния между интерференционными полосами. В этом эксперименте расстояние между локальными максимумами интерференционной картины в окрестностях ее центра равно 1,5 мм.

Когда интерферометр находится в рабочей точке, интенсивность падающего излучения становится пропорциональна фазе интерференционной полосы, которая, в свою очередь, является функцией перемещения подвижного зеркала. Для оценки величины смещения подвижного зеркала используются методы интерполяции.

Напряжение на выходе усилителя фотодиода $u(t)$ при малых колебаниях пьезоэлемента, составляющих менее $\frac{\lambda}{8}$, описывается уравнением [17]:

$$u(t) = u_0 + u_\lambda \cos\left(\frac{\pi}{2} - \varphi(t)\right),$$

где u_0 — напряжение смещения, обусловленное темновым током фотодиода и рабочей точкой усилителя, u_λ — амплитуда напряжения при прохождении интерференционной полосы через апертуру диафрагмы фотодиода, $\varphi(t)$ — фаза колебаний интенсивности интерференционной полосы.

В свою очередь, изменение фазы сигнала фотодатчика $\Delta\varphi$ связано с деформацией пьезоэлемента ΔX уравнением:

$$\Delta X = \left(N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi}\right) \frac{\lambda}{2},$$

где N — число интервалов $[0, 2\pi]$, λ — длина волны лазера.

электрического диска толщиной 0,5 мм и подложки 2 из нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. К геометрическому центру крепится держатель второго пьезоэлемента 3, выполненный из латуни. Исследуемый пьезоэлемент 4 крепится в держателе таким образом, чтобы зафиксирован был только край нижней части. Для этого используется специальное тонкостенное кольцо 5. К центру нижнего электрода крепится держатель 6 подвижного зеркала 7, который также выполнен из латуни.

Такая конструкция позволяет перемещать подвижное зеркало в осевом направлении, изменяя таким образом длину оптического хода одного из плеч интерферометра.

Первый пьезоэлемент может развивать значительную амплитуду колебаний в осевом направлении, которая составляет порядка нескольких микрометров и используется для выведения интерферометра в рабочую точку, когда граница интерференционной полосы проходит посередине диафрагмы фотодиода (рис. 7).

Фотодиод помещен в светонепроницаемый латунный корпус 1, передняя часть которого закрыта шторкой 2 (рис. 7). Конструкция расположена на неподвижном штативе 3, закрепленном на оптическом столе. Шторка снабжена отверстиями различного диаметра.

В первом эксперименте гармонический сигнал амплитудой 20 В и частотой 400 Гц подавался на электрод 2. Фотодиод был подключен к трансимпедансному усилителю, собранному на микросхеме LM358; сигнал с усилителя записывался осциллографом. На рис. 8 представлены эпюры напряжения на фотодиоде при измерении малых перемещений (возбуждение на электрод-кольцо).

Анализ рис. 8 позволяет сделать вывод о том, что сигнал с фотодиода отстает по фазе от сигнала возбуждения, следовательно, система пребывает в окрестностях резонанса. Акустический резонанс наблюдается на частоте около 8 кГц. Амплитуда колебаний составляет около 36,8 мВ. При подаче напряжения возбуждения на другой электрод амплитуда сигнала составляет около 5,0 мВ. По сравнению с первой конфигурацией, амплитуда снизилась в 7,4 раза.

Результаты. Оценка амплитуды напряжения отклика пьезоэлектрического преобразователя проводилась с использованием конечно-элементной модели и измерения напряжения отклика при резонансе чувствительного элемента вибрационного сигнализатора уровня (табл. 2). Поскольку пьезоэлемент в эксперименте не имел электрода на боковой поверхности, проверить все конфигурации электродов из модели не удалось.

Из табл. 2 видно, что при сигнале возбуждения, подаваемом на электрод 1, расхождение амплитуды напряжения отклика на электроде 2 составляет не более 20 %. При сигнале возбуждения, подаваемом на электрод 2, напряжение отклика на электроде 1 отличается от результатов моделирования в 1,7 раза. Это может объясняться влиянием резонансных свойств камертонов, к которому был присоединен пьезоэлемент.

Таблица 2

| Конфигурация | Напряжение отклика, В | | Амплитудное значение деформации, нм | |
|--------------|-----------------------|-------------|-------------------------------------|-------------|
| | моделирование | эксперимент | моделирование | эксперимент |
| I | 1,21 | 1,5 | 5 | 3,2 |
| II | 4,17 | 2,4 | 20 | 23,7 |

Оценка амплитуды колебаний нижней поверхности пьезоэлемента в осевом направлении получена с использованием конечно-элементного моделирования и экспериментов по измерению деформации пьезоэлемента методами лазерной интерферометрии (см. табл. 2). Динамический диапазон сигнала на выходе усилителя фотодиода при прохождении интерференционных полос составляет 481 мВ.

Из табл. 2 видно, что полученная в модели тенденция подтверждается результатами эксперимента. Для дальнейшей верификации модели необходимо провести эксперименты по измерению пьезомодуля d_{33} .

Выводы. В статье при помощи методов конечно-элементного моделирования и лазерной интерферометрии исследована деформация пьезоэлектрического диска с независимыми электродами. Напряжение отклика, формируемое на одном из электродов пьезоэлемента, исследовано с помощью конечно-элементного моделирования и лабораторных экспериментов.

Данные, полученные в результате экспериментов, показали хорошую сходимость с данными, полученными в результате моделирования. Незначительное расхождение в величине де-

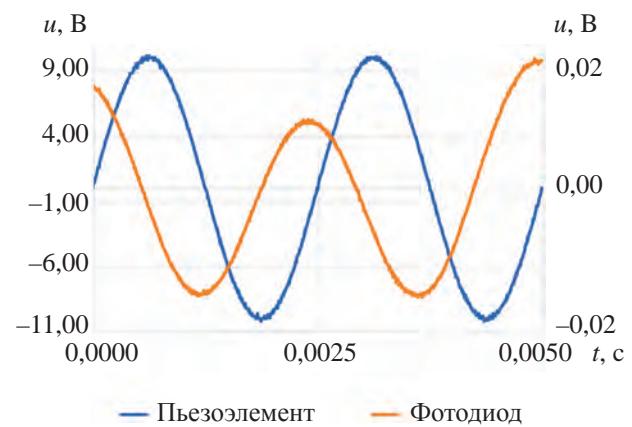


Рис. 8

Journal of Instrument Engineering. 2025. Vol. 68, N 4

формации обуславливается отклонением значений пьезоэлектрических модулей, используемых при моделировании, от пьезоэлектрических модулей реальных образцов пьезокерамики.

Полученные результаты позволяют определить оптимальное назначение электродов пьезоэлемента в составе конечного изделия — вибрационного сигнализатора уровня. Для получения максимальных осевых деформаций и амплитуды напряжения отклика необходимо сигнал возбуждения подавать на кольцевой электрод (см. рис. 2), информационный сигнал снимать с дискового электрода, а в качестве опорного использовать электрод, расположенный на нижней поверхности пьезоэлемента.

Хорошая сходимость данных моделирования и экспериментальных позволяет применить выбранный метод моделирования для прогнозирования мод колебаний пьезоэлементов при иных конфигурациях электродов, что может быть использовано для оптимизации конструкции пьезоэлементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ivina N. F. Analysis of the natural vibrations of circular piezoceramic plates with partial electrodes // Acoustical physics. 2001. Vol. 47, N 6. P. 417–420.
2. Krushynska A. et al. Mode excitation efficiency for contour vibrations of piezoelectric resonators // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2011. Vol. 58, N 10. P. 2222–2238.
3. Kim D. J., Oh S. H., and Kim J. O. Measurements of Radial In-plane Vibration Characteristics of Piezoelectric Disk Transducers // Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. January 2015. Vol. 25. P. 13–23. DOI:10.5050/KSNVE.2015.25.1.013.
4. Yu-Hsi Huang. Electromechanical coupling efficiency of transverse vibration in piezoelectric plates according to electrode configuration // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2013. Vol. 36. P. 842–855.
5. Pan Ch., Xiao G., Feng Z., Liao W.-H. Electromechanical characteristics of discal piezoelectric transducers with spiral interdigitated electrodes // Smart Materials and Structures. 2014. Vol. 23, N 12. DOI 10.1088/0964-1726/23/12/125029.
6. Lin Y.-C. and Ma C.-C. Experimental Measurement and Numerical Analysis on Resonant Characteristics of Piezoelectric Disks with Partial Electrode Designs // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2004. Vol. 51. P. 937–947.
7. Carbonari R. C., Silva E. C. N., and Nishiwaki S. Optimum placement of material in piezoactuator design // Smart Materials and Structures. 2007. Vol. 16, N 1. P. 207–220.
8. Кандауров А. А. Моделирование поверхностных колебаний пьезоэлектрических резонаторов // Ползуновский вестник. 2008. № 4. С. 100–104.
9. Deferrari H. A., Darby R. A. and Andrews F. A. Vibrational displacement and mode-shape measurement by a laser interferometer // The Journal of the Acoustical Society of America. 1967. Vol. 42, N 5. P. 982–990.
10. Barbosa Fr. A. A., Nader G., Higuti R. T. A simple interferometric method to measure the calibration factor and displacement amplification in piezoelectric flexensional actuators // Sba Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica. Dec. 2010. P. 577–587. DOI:10.1590/S0103-17592010000600003.
11. Электрофизические параметры пьезокерамических материалов компании Аврора-ЭЛМА [Электронный ресурс]: <<https://avrora-elma.ru/upload/iblock/50b/wjjf2umpnkgxsurrki9zeal7ox2coe6z.pdf>>. (20.09.2024).
12. Lin Hsien-Yang, Huang Jin H., Ma Chien-Ching. Vibration Analysis of Piezoelectric Materials by Optical Methods // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2002. Vol. 49, N 8. P. 1139 –1149. DOI: 10.1109/TUFFC.2002.1026026.
13. Colcheroa L., Colcheroa J., Go'mez H. J., Prietoa E., Baro A., Huang W. H. Comparison of strain gage and interferometric detection for measurement and control of piezoelectric actuators // Materials Characterization. 2002. Vol. 48, N 2-3. P. 133–140. DOI:10.1016/S1044-5803(02)00191-2.
14. Libbrecht K. G., Black E. D. A Basic Michelson Laser Interferometer for the Undergraduate Teaching Laboratory Demonstrating Picometer Sensitivity // American Journal of Physics. 2015. Vol. 83, N 5. P. 409–417. DOI: 10.1119/1.4901972.
15. Pisani M. A homodyne Michelson interferometer with sub-picometer resolution // Measurement Science and Technology. 2009. Vol. 20, N 8. P. 084008. DOI:10.1088/0957-0233/20/8/084008.
16. Ma C. C., Huang C. H. The investigation of threedimensional vibration for piezoelectric rectangular parallelepipeds using the AF-ESPI method // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. 2001. Vol. 48, N 1. P. 142–153. DOI:10.1109/58.895923.
17. Кирьянов В. П., Коронкевич В. А. Лазерные интерферометры перемещений // Автометрия. 1998. № 6. С. 65–84.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Артём Максимович Бражников

— аспирант; Самарский государственный технический университет, кафедра „Радиотехнические устройства“; инженер; E-mail: ArtemBragnicov@yandex.ru

Сергей Юрьевич Ганигин

— д-р техн. наук, профессор; Самарский государственный технический университет, кафедра „Радиотехнические устройства“; заведующий кафедрой; E-mail: ganigin.s.yu@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.08.24; одобрена после рецензирования 23.09.24; принята к публикации 27.02.25.

REFERENCES

1. Ivina N.F. *Acoustical physics*, 2001, no. 6(47), pp. 417–420.
2. Krushynska A. et al. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2011, no. 10(58), pp. 2222–2238.
3. Kim D.J., Oh S.H., and Kim J.O. *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 2015, no. January(25), pp. 13–23. DOI:10.5050/KSNVE.2015.25.1.013
4. Yu-Hsi Huang, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2013, vol. 36, pp. 842–855.
5. Pan Ch., Xiao G., Feng Z., Liao W.-H. *Smart Materials and Structures*, 2014, no. 12(23), DOI 10.1088/0964-1726/23/12/125029.
6. Lin Y.-C. and Ma C.-C. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2004, vol. 51, pp. 937–947.
7. Carbonari R.C., Silva E.C.N., and Nishiwaki S. *Smart Materials and Structures*, 2007, no. 1(16), pp. 207–220.
8. Kandaurov A.A. *Polzunovsky Vestnik*, 2008, no. 4, pp. 100–104. (in Russ.)
9. Deferrari H.A., Darby R.A. and Andrews F.A. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, no. 5(42), pp. 982–990.
10. Barbosa F.A.A., Nader G., Higuti R.T. *Sba Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, 2010, Dec., pp. 577–587, DOI:10.1590/S0103-17592010000600003.
11. <https://avrorra-elma.ru/upload/iblock/50b/wjjf2umpnkgsurrki9zeal7ox2coe6z.pdf>. (in Russ.)
12. Lin Hsien-Yang, Huang Jin H., Ma Chien-Ching, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2002, no. 8(49), pp. 1139–1149, DOI: 10.1109/TUFFC.2002.1026026.
13. Colcheroa L., Colcheroa J., Go'mez Herreroa J., Prietob E., Baro A., Huanga W.H. *Materials Characterization*, 2002, no. 2-3(48), pp. 133–140, DOI:10.1016/S1044-5803(02)00191-2.
14. Libbrecht K.G., Black E.D. *American Journal of Physics*, 2015, no. 5(83), pp. 409–417, DOI: 10.1119/1.4901972.
15. Pisani M. *Measurement Science and Technology*, 2009, no. 8(20), pp. 084008, DOI:10.1088/0957-0233/20/8/084008.
16. Ma C.C., Huang C.H. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2001, no. 1(48), pp. 142–153, DOI:10.1109/58.895923.
17. Kiryanov V.P., Koronkevich V.P. *Avtometriya*, 1998, no. 6, pp. 65–84. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

Artem M. Brazhnikov

— Post-Graduate Student; Samara State Technical University, Department of Radio Engineering Devices; Engineer; E-mail: ArtemBragnicov@yandex.ru

Sergei Yu. Ganigin

— Dr. Sci., Professor; Samara State Technical University, Department of Radio Engineering Devices; Head of the Department; E-mail: ganigin.s.yu@yandex.ru

Received 12.08.24; approved after reviewing 23.09.24; accepted for publication 27.02.25.