

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-1-63-76

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ДИСКОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ТАРЕЛКООБРАЗНЫМИ НАКЛАДКАМИ
И АКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ИЗ ПОРИСТОЙ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ
С ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ПРОВОДИМОСТЬЮ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОР***

© 2023 г. **Наседкин А.В.¹, Наседкина А.А.¹, Нассар М.Э.^{1,2}**

¹*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

²*Университет Менуфия, Эль-Менуфия, Египет*

nasedkin@math.sfedu.ru

Поступила в редакцию 17.11.2022

Представлен конечно-элементный анализ дискового пьезоизлучателя с тарельчатыми накладками, который обычно называется Сумбал-преобразователем. Эффективность работы такого преобразователя определяется как его геометрическими размерами, так и величинами продольного и поперечного пьезомодулей (пьезоэлектрических коэффициентов заряда) пьезокерамического материала диска. У пористой пьезокерамики с полностью металлизированными поверхностями пор эффективные поперечный и продольный пьезомодули с ростом пористости увеличиваются по абсолютной величине в отличие от обычной пористой пьезокерамики. Эти необычные свойства пористой пьезокерамики с металлизацией поверхности пор определяются свойствами фаз, составляющих пьезокомпозитный материал, и в частности, большой проводимостью материала поверхности пор внутри в целом диэлектрической композитной среды. Основная задача исследования – определение эффективности работы Сумбал-преобразователя в зависимости от типа пористого пьезоэлектрического материала диска. Сравнение проводилось для сплошной пьезокерамики, для обычной пористой пьезокерамики, для пористой пьезокерамики с тонким металлическим покрытием пор и для пористой пьезокерамики с относительно толстым слоем металлизации на поверхности пор при различной пористости. В конечно-элементном пакете ANSYS проведены расчеты установившихся колебаний в Сумбал-преобразователе при нерезонансных режимах работы и вблизи первых электрически активных частот, что соответствует применению преобразователя как устройства для сохранения энергии и как пьезоэлектрического излучателя акустических волн. В обоих случаях результаты вычислительных экспериментов показали перспективность использования новых типов пористых пьезокерамических материалов для рассмотренных конфигураций дискового пьезоэлектрического преобразователя с тарельчатыми накладками. Наилучшие результаты были получены для пористого пьезокерамического материала с тонким металлическим покрытием пор.

*Выполнено при поддержке РФФ в рамках проекта № 22-11-00302, <https://rscf.ru/project/22-11-00302/>, в Южном федеральном университете.

Ключевые слова: пьезоэлектричество, гибкий пьезопреобразователь, пористая пьезокерамика, металлизация поверхности пор, резонансная частота, актуатор, пьезогенератор, метод конечных элементов.

Введение

Гибкие пьезоэлектрические преобразователи находят достаточно широкое применение в современных сенсорах, актуаторах, излучателях и генераторах возобновляемой энергии. Пьезопреобразователи с тарелкообразными накладками (Cymbal transducers) составляют один из пяти классов гибких преобразователей [1, 2]. В стандартных вариантах Cymbal-преобразователи представляют собой трехслойные конструкции, в которых к пьезокерамическому диску сверху и снизу приклеены гибкие металлические накладки тарельчатых форм. Основная особенность таких преобразователей состоит в возможности генерирования достаточно больших вертикальных перемещений накладок при радиальных или планарных колебаниях пьезокерамического диска.

Преобразователь подобного рода был подробно описан впервые, по-видимому, в [3] и в других публикациях тех же авторов. Cymbal-преобразователь продемонстрировал большую эффективность, что определило интерес к его исследованиям. Так, можно отметить обзор [4], анализ влияния геометрических размеров на коэффициенты электромеханического преобразования [5, 6], исследования работы излучателя во внешней среде [7, 8] и др. Актуальные применения пьезоустройств в источниках возобновляемой энергии [9, 10] затронули и Cymbal-преобразователи [11–15].

Как было показано в [5], эффективный продольный пьезокоэффициент преобразователя d_{33}^s является линейной комбинацией продольного пьезомодуля d_{33} и поперечного пьезомодуля d_{31} пьезокерамического материала. Таким образом, эффективность электромеханического преобразования можно повышать не только варьированием размеров конструкции, но и подбирая пьезоэлектрический материал преобразователя с высокими значениями пьезомодулей d_{33} и $|d_{31}|$. Недавние результаты компьютерного моделирования пористых пьезокерамических материалов с металлизированными поверхностями пор [16–18] показали, что у таких материалов с ростом пористости значения пьезомодулей d_{33} и $|d_{31}|$ возрастают. Поэтому представляет интерес исследование эффективности использования этих пористых пьезоматериалов в различных пьезоэлектрических устройствах и, в том числе, в Cymbal-преобразователях. Подобное исследование было представлено ранее в [19] для Cymbal-преобразователя как пьезоизлучателя. Однако в [19] использовались данные о материалах из [16], которые содержали неточности. В настоящей статье на основе новых данных об эффективных свойствах пьезокерамик с металлизированными порами [18] анализируются свойства Cymbal-преобразователей как для применений в качестве излучателей, так и для использования в генераторах возобновляемой энергии.

1. Постановка задачи и методология конечно-элементного моделирования

Рассмотрим осесимметричный пьезопреобразователь, состоящий из пьезоэлектрического диска с наклеенными на его торцы металлическими накладками тарелкообразной формы. Меридиональное сечение S преобразователя в цилиндрической системе координат $Orz\theta$ и его трехмерная форма показаны на рис. 1. Примем следующие обозначения: R_d – радиус пьезоэлектрического диска, h_d – толщина дис-

ка, R_1 – максимальный радиус полости, R_2 – радиус плато полости, h_e – максимальная высота полости вдоль оси симметрии, h_m – толщина одной из металлических накладок. Как видно из рис. 1, каждая из монолитных накладок имеет гладкие поверхности и состоит из трех геометрически различных частей одинаковой толщины: внешнего кольца, склеенного с пьезокерамическим диском по поверхности соприкосновения; внутреннего диска, сдвинутого по оси симметрии на величину h_e относительно внешнего кольца; соединительного полого усеченного конуса. Такая форма накладок является стандартной для Symbal-преобразователей.

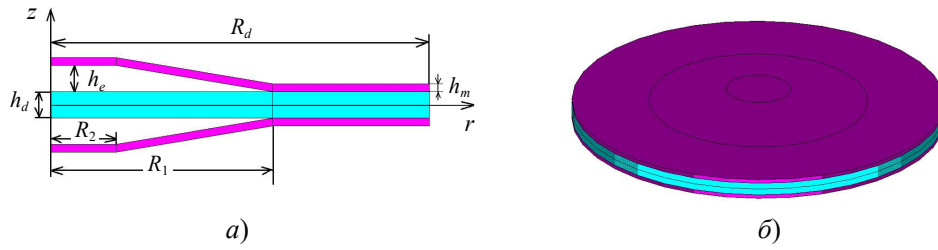


Рис. 1. Меридиональное сечение (а) и 3D-форма преобразователя (в другом масштабе) (б)

Пусть диск преобразователя выполнен из поляризованного в направлении оси Oz пористого пьезокерамического материала PZT-5Н. В дальнейшем будем рассматривать различные варианты пористой пьезокерамики: как обычной, так и с полностью покрытыми металлом поверхностями пор [17, 18]. При этом в зависимости от практических применений будем также варьировать граничные условия пьезопреобразователя и материальные свойства накладок.

Будем считать, что верхняя и нижняя торцевые поверхности пьезоэлектрического диска ($\Gamma_{\varphi j} = \{r \in [0, R_d], z = \pm h_d/2\}, j = 1, 2$) электродринированы и пьезоэлектрический диск по поверхностям контакта $\{R_1 \leq r \leq R_d, z = \pm h_d/2\}$ жестко склеен с металлическими тарелкообразными накладками.

Для пьезопреобразователя будем использовать уравнения электроупругости, которые в режиме установившихся колебаний $\exp i\omega t$ при частоте $f = \omega/(2\pi)$ для амплитудных значений перемещений $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \{u_1(\mathbf{x}), u_2(\mathbf{x}), u_3(\mathbf{x})\}$ и электрического потенциала $\varphi(\mathbf{x})$ в декартовой системе координат $Ox_1x_2x_3$ представим в виде:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \omega^2 \mathbf{u} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{T} = (1 + iQ_d^{-1}) \mathbf{c}^E \cdot \mathbf{S} - \mathbf{e}^* \cdot \mathbf{E}, \quad \mathbf{D} = \mathbf{e} \cdot \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \cdot \mathbf{E}, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^*}{2}, \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi. \quad (3)$$

Здесь $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений с компонентами σ_{kl} ; $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформаций с компонентами ε_{kl} ; $\mathbf{T} = \{\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{23}, \sigma_{13}, \sigma_{12}\}$, $\mathbf{S} = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, 2\varepsilon_{23}, 2\varepsilon_{13}, 2\varepsilon_{12}\}$ – массивы компонент тензоров напряжений и деформаций соответственно; \mathbf{D} – вектор электрической индукции; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля; ρ – плотность; \mathbf{c}^E – 6×6 -матрица упругих жесткостей, измеренных при постоянном электрическом поле; \mathbf{e} – 3×6 -матрица пьезомодулей; $\boldsymbol{\varepsilon}^S$ – 3×3 -матрица диэлектрических проницаемостей, измеренных при постоянных деформациях; Q_d – механическая добротность при частотно-независимом способе учета демпфирования; i – мнимая единица; $(\dots)^*$ – операция транспонирования матриц.

Уравнения (1)–(3) для механических полей при $\mathbf{e} = 0$ являются уравнениями теории упругости при том же способе учета демпфирования, поэтому они описывают также колебания упругих накладок в пьезопреобразователе.

Для осесимметричной задачи $\mathbf{u} = \mathbf{u}(r, z)$, $\varphi = \varphi(r, z)$, и систему уравнений (1)–(3) можно представить в цилиндрической системе координат $Orz\theta$ с соответствующими механическими и электрическими краевыми условиями на границе $\Gamma = \partial S$. Здесь опишем только условия закрепления, условия на электродированных границах и механические активные условия, предполагая, что остальные краевые условия являются однородными естественными граничными условиями, а в местах склейки диска и накладок выполняются условия полного контакта. Естественно, что для меридионального сечения надо еще принять условия симметрии вдоль оси Oz .

Рассмотрим два типа пьезопреобразователя для различных применений. Преобразователь типа A ориентирован на задачи сохранения энергии от механических низкочастотных воздействий, а преобразователь типа B должен работать в резонансном режиме и генерировать акустические волны при электрических воздействиях.

В преобразователе A нижнее плато $\Gamma_{e1} = \{r \in [0, R_2], z = -h_c\}$, $h_c = h_m + h_e + h_d/2$, жестко закреплено, а на верхнее плато $\Gamma_{e2} = \{r \in [0, R_2], z = h_c\}$ действует осциллирующее с частотой f давление с амплитудой $P = F/|\Gamma_{e2}|$, где F – суммарная сила. Электродированные границы диска являются эквипотенциальными, то есть $\varphi = \Phi_j$, где значения потенциалов Φ_j постоянны для всех $\mathbf{x} \in \Gamma_{\varphi j}$. Эти электроды в преобразователе A связаны внешней электрической цепью с сопротивлением R .

В преобразователе B грани Γ_{e_j} считаются свободными от напряжений, но в крайних точках $\Gamma_u = \{r = R_d, z = \pm(h_m + h_d/2)\}$ фиксируется осевое смещение $u_z = 0$. Акустические колебания в преобразователе генерируются или подачей разности потенциалов $\Delta V = |\Phi_2 - \Phi_1|$ между электродами, или заданным зарядом $Q = -\int_{\Gamma_{\varphi 2}} \mathbf{n}^* \cdot \mathbf{D} d\Gamma$ на одном электроде при нулевом потенциале $\Phi_1 = 0$ на другом электроде. Так как рассматриваются задачи для амплитудных значений перемещений и электрического потенциала, то множитель $\exp i\omega t$ всюду опущен.

Для численного решения задач (1)–(3) с соответствующими граничными условиями можно перейти к их слабым постановкам и использовать технику конечно-элементных аппроксимаций [20, 21]. Пусть $\Omega_h = S_h \cup [0, 2\pi]$, S_h – область, занимаемая соответствующей конечно-элементной сеткой, $S_h \subseteq S$, $S_h = \bigcup_k S^{ek}$, где S^{ek} – отдельный конечный элемент с номером k . Для задач об установившихся колебаниях можно искать приближенное решение $\{\mathbf{u}_h \approx \mathbf{u}, \varphi_h \approx \varphi\}$ в форме

$$\mathbf{u}_h(r, z) = \mathbf{N}_u^*(r, z) \cdot \mathbf{U}, \quad \varphi_h(r, z) = \mathbf{N}_\varphi^*(r, z) \cdot \Phi, \quad (4)$$

где \mathbf{N}_u^* – матрица базисных функций для перемещений; \mathbf{N}_φ^* – вектор-строка базисных функций для электрического потенциала; \mathbf{U} , Φ – векторы узловых амплитуд перемещений и электрического потенциала.

В соответствии с обычной конечно-элементной техникой аппроксимируем континуальную слабую постановку задачи пьезоэлектричества в конечномерных пространствах, связанных с базисными функциями \mathbf{N}_u^* , \mathbf{N}_φ^* [21]. Подставляя (4) и аналогичные представления для проекционных функций в слабую постановку задачи пьезоэлектричества для Ω_h , получим конечно-элементную систему:

$$[-\omega^2 \mathbf{M}_{uu} + (1 + iQ_d^{-1}) \mathbf{K}_{uu}] \cdot \mathbf{U} + \mathbf{K}_{u\varphi} \cdot \Phi = \mathbf{F}_u, \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{u\varphi}^* \cdot \mathbf{U} - \mathbf{K}_{\varphi\varphi} \cdot \Phi = -\mathbf{F}_{\varphi}, \quad (6)$$

где \mathbf{M}_{uu} , \mathbf{K}_{uu} , $\mathbf{K}_{u\varphi}$ и $\mathbf{K}_{\varphi\varphi}$ – матрицы масс, жесткости, пьезоэлектрической связности и диэлектрической проницаемости соответственно; \mathbf{F}_u , \mathbf{F}_{φ} – векторы обобщенных узловых сил и зарядов, получающиеся при учете внешних воздействий.

Из (5), (6) можно получить задачи на собственные частоты при $Q_d^{-1} = 0$, $\mathbf{F}_u = 0$, $\mathbf{F}_{\varphi} = 0$. При этом, кроме задачи на поиск частот электрических резонансов f_{rm} при нулевых потенциалах на электродах, нужно еще решить задачу об определении частот электрических антирезонансов f_{am} , когда на одном электроде равен нулю электрический потенциал, а на другом – заряд. Решение этих двух задач позволяет определить электрически активные частоты [21], для которых значения f_{rm} и f_{am} при одних и тех же номерах заметно отличаются, вычислить для них динамические коэффициенты электромеханической связи $k_{dm} = \sqrt{1 - f_{rm}^2 / f_{am}^2}$ и построить амплитудно-частотные характеристики в окрестности этих частот.

2. Входные данные для расчетов

Геометрические размеры Сymbal-преобразователя примем аналогично [12]: радиус пьезоэлектрического диска $R_d = 14,5$ мм, толщина диска $h_d = 1$ мм, радиус начала возвышения накладок $R_1 = 8,5$ мм, радиус плато накладок $R_2 = 2,5$ мм, высота возвышения накладок $h_e = 1$ мм, толщина накладок $h_m = 0,3$ мм. Для металлических накладок в случае преобразователя *A* принимаем материальные свойства стали, как изотропного упругого материала с плотностью $\rho_m = 7800$ кг/м³, модулем Юнга $E_m = 2 \cdot 10^{11}$ Н/м² и коэффициентом Пуассона $\nu_m = 0,29$, а в случае преобразователя *B* – свойства латуни с $\rho_m = 8400$ кг/м³, $E_m = 9,5 \cdot 10^{10}$ Н/м² и $\nu_m = 0,35$. Добротность Q_d задавалась равной 1000 для металлических накладок и 800 для пьезокерамического диска. Эти значения добротности не менялись при расчетах, поскольку диапазоны частот далее выбирались относительно небольшими.

Для пьезоэлектрического диска рассмотрим три варианта различной пористой пьезокерамики PZT-5Н с эффективными материальными свойствами, рассчитанными по методологии из [18] для представительного объема со сферической порой и периодическими граничными условиями. Именно в [18] для определения полного набора эффективных модулей $c_{\alpha\beta}^{E\text{eff}}$, $e_{j\beta}^{\text{eff}}$ и $\varepsilon_{jj}^{S\text{eff}}$ в конечно-элементном пакете ANSYS решались пять статических задач электроупругости для представительного объема с различными линейными по x_k главными граничными условиями для перемещений и электрического потенциала. Далее по осредненным полям напряжений и электрической индукции определялись эффективные модули.

Результаты вычисления эффективных модулей трех вариантов пористой пьезокерамики PZT-5Н для различной пористости p приведены в таблице 1, где первый столбец обозначает номер варианта. Здесь значения для варианта с номером 0 относятся к сплошной плотной керамике при нулевой пористости и являются исходными для расчетов, а вариант 1 соответствует обычной пористой пьезокерамике.

Вариант 2 относится к пористой пьезокерамике с полностью металлизированными поверхностями пор, причем толщина слоя металла считается достаточно малой. Этот случай отличается тем, что на поверхностях пор надо задавать дополнительный слой с механическими свойствами металла, с пренебрежимо малыми пьезомодулями и с большими диэлектрическими проницаемостями. В качестве материала металлического слоя принимался никель с плотностью $\rho_s = 8800$ кг/м³, модулем

Юнга $E_s = 20,4 \cdot 10^{10}$ Н/м² и коэффициентом Пуассона $\nu_s = 0,28$. Толщина слоя h_s определялась исходя из отношения ν_s объема слоя $|\Omega_s|$ к объему составной поры $|\Omega_p|$, включающей как собственно пору, так и слой металла: $\nu_s = |\Omega_s|/|\Omega_p|$. Результаты вычислений эффективных модулей пористой пьезокерамики PZT-5Н с металлизированными границами пор малой толщины ($\nu_s = 0,01$) для различной пористости приведены в таблице в варианте 2.

В варианте 3 учитывается, что поры полностью покрыты достаточно толстым слоем металла ($\nu_s = 0,27$). В этом случае толщина слоя h_s составляет приблизительно одну десятую часть от радиуса составной поры.

Таблица 1

Материальные свойства различных вариантов пористой пьезокерамики PZT-5Н

№	p , %	ρ , кг/м ³	$c_{\alpha\beta}^{E\text{eff}}, 10^{10}$ Н/м ²					$e_{j\beta}^{\text{eff}}, \text{Кл/м}^2$			$\tilde{\epsilon}_{ij}^{S\text{eff}} = \epsilon_{ij}^{S\text{eff}}/\epsilon_0$	
			$c_{11}^{E\text{eff}}$	$c_{12}^{E\text{eff}}$	$c_{13}^{E\text{eff}}$	$c_{33}^{E\text{eff}}$	$c_{44}^{E\text{eff}}$	e_{33}^{eff}	e_{31}^{eff}	e_{15}^{eff}	$\tilde{\epsilon}_{11}^{S\text{eff}}$	$\tilde{\epsilon}_{33}^{S\text{eff}}$
0	0	7500	12,6	7,95	8,41	11,7	2,3	23,3	-6,5	17,0	1700	1470
1	10	6750	9,77	5,78	5,94	8,66	1,98	20,9	-4,2	14,3	1520	1300
	20	6000	7,76	4,31	4,32	6,63	1,7	18,3	-2,93	11,9	1340	1130
	30	5250	6,2	3,25	3,2	5,18	1,45	15,7	-2,15	9,91	1150	960
	40	4500	4,93	2,46	2,4	4,08	1,21	13,2	-1,62	8,16	980	810
	50	3750	3,87	1,86	1,82	3,21	0,99	10,7	-1,24	6,62	810	670
2	10	6760	9,21	5,22	5,59	8,46	1,97	15,81	-12,12	15,5	2760	2480
	20	6020	7,12	3,65	3,97	6,49	1,69	11,28	-15,49	14,31	4130	3620
	30	5280	5,64	2,65	2,93	5,11	1,44	7,97	-17,74	13,2	6090	5180
	40	4540	4,5	1,98	2,21	4,06	1,21	5,23	-19,32	12,0	9330	7670
	50	3790	3,58	1,51	1,69	3,23	1,0	2,79	-20,48	10,7	18180	13900
3	10	6990	10,8	6,47	6,88	10,1	2,16	19,7	-9,62	16,4	2710	2360
	20	6480	9,49	5,36	5,73	8,83	2,04	17,1	-12,1	16,0	4030	3440
	30	5970	8,42	4,5	4,84	7,85	1,93	15,2	-14,2	15,8	5920	4930
	40	5460	7,55	3,81	4,11	7,07	1,83	13,8	-16,0	15,7	9080	7330
	50	4950	6,82	3,24	3,51	6,41	1,75	12,8	-16,0	15,7	17700	13500

Как видно из таблицы, металлизация пор существенно влияет на эффективные материальные свойства пьезокомпозитного материала [17, 18]. Именно эффективные модули жесткости убывают с ростом пористости p для всех трех вариантов, причем покрытие пор тонким слоем металла (вариант 2) дает немного большее убывание модулей по сравнению с вариантом обычной пористой пьезокерамики (вариант 1). При большей толщине покрытия пор металлом (вариант 3) модули жесткости убывают с ростом p в меньшей степени. В то же время эффективные диэлектрические проницаемости обычной пористой пьезокерамики (вариант 1) убывают с ростом p , но возрастают для пористой пьезокерамики с металлизированными порами (варианты 2 и 3), причем увеличение объема металлизированного покрытия пор незначительно уменьшает рост диэлектрических проницаемостей. Еще более интересно поведение пьезомодулей. Так, пьезомодули e_{33}^{eff} и $|e_{31}^{\text{eff}}|$ для обычной пористой пьезокерамики убывают с ростом пористости. Однако для пьезокерамики с металлизированными поверхностями пор пьезомодули e_{33}^{eff} убывают с ростом p , причем быстрее в случае очень тонкого покрытия, в то время как пьезомодули $|e_{31}^{\text{eff}}|$ возрастают при увеличении p .

Сильное различие в поведении материальных модулей $c_{\alpha\beta}^{E\text{eff}}$, $e_{i\alpha}^{\text{eff}}$ и $\epsilon_{ij}^{S\text{eff}}$ при металлизации пор обуславливает и различие зависимостей от пористости других

модулей, например пьезомодулей $d_{i\alpha}^{\text{eff}} = e_{i\beta}^{\text{eff}} s_{\beta\alpha}^{E\text{eff}}$, где $s_{\beta\alpha}^{E\text{eff}}$ – компоненты матрицы эффективных податливостей, обратной к матрице эффективных жесткостей. Так, если для обычной пористой пьезокерамики пьезомодуль d_{33}^{eff} практически не зависит от пористости p , а пьезомодуль $|d_{31}^{\text{eff}}|$ убывает с ростом p , то учет металлизации пор приводит к росту как пьезомодуля d_{33}^{eff} , так и $|d_{31}^{\text{eff}}|$. Этот рост становится значительно сильнее с уменьшением толщины металла на границах пор. Таким образом, можно ожидать, что использование пористой пьезокерамики с металлизированными границами пор и изменение пористости будут оказывать существенное влияние на эффективность рассматриваемого пьезопреобразователя.

3. Численные результаты

Конечно-элементное моделирование Сymbal-преобразователя было проведено в программном комплексе ANSYS по методологии, описанной в [21]. Во всех расчетах использовались канонические четырехугольные сетки из элементов PLENE13 с пьезоэлектрическими свойствами и из упругих элементов PLANE182 с опциями осесимметричной задачи. Вся конструкция преобразователя в меридиональном сечении подразделялась на четырехугольные области, в которых по длине использовалось 29 конечных элементов, а по толщине – 6 элементов для металлических накладок и 12 элементов для пьезоэлектрического диска. Такое разбиение обеспечивало достаточную точность расчетов относительно результатов, полученных при дальнейшем сгущении конечно-элементной сетки.

Для преобразователя типа *A* рассматривался режим установившихся колебаний в нерезонансном диапазоне частот $f \in [10, 200]$ Гц, что соответствует его применению в качестве устройства для сбора энергии. При нагружении преобразователя давлением с суммарной силой $F = 100$ Н определялась максимальная наведенная разность потенциалов ΔV между электродами диска при их соединении электрической цепью с сопротивлением $R = 5$ кОм. Результаты расчетов задачи (5), (6) для наведенной разности потенциалов в зависимости от пористости показаны на рис. 2а. Здесь и далее кривые с номером 1 построены для обычной пористой пьезокерамики, кривые 2 – для пористой пьезокерамики с тонким металлическим покрытием поверхности пор ($v_s = 0,01$), кривые 3 – для пористой пьезокерамики с достаточно толстым слоем металлического покрытия ($v_s = 0,27$). Характерный вид деформированного состояния для одного из вариантов расчета показан на рис. 2б.

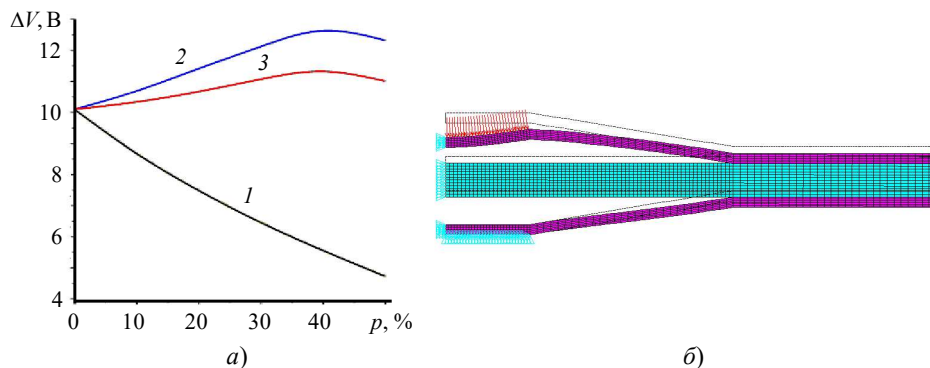


Рис. 2. Наведенная разность потенциалов (а) и вид деформированного состояния (б)

Как видно из рис. 2а, для пористой пьезокерамики с тонким слоем металлизации поверхности пор достигаются наивысшие значения наведенной за счет пьезоэффекта разности потенциалов, причем разность потенциалов возрастает с ростом пористости до 40% как для варианта 2, так и для варианта 3. Обычная пористая пьезокерамика в составе преобразователя с тарелкообразными накладками здесь демонстрирует худшие свойства сохранения энергии по сравнению с плотной и, тем более, по сравнению с пористой пьезокерамикой с металлизацией поверхностей пор.

Исследования частотных характеристик в режиме установившихся колебаний преобразователя типа В как пьезоизлучателя акустических волн во внешнюю среду при его электрическом возбуждении проводились в два этапа. На первом этапе в ANSYS решались задачи об определении электрически активных первых частот резонансов f_{r1} и антирезонансов f_{a1} , а на втором этапе частотные характеристики строились по результатам вычислений, полученных на интервалах, включающих соответствующие частоты резонансов и антирезонансов.

Для анализа выберем амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) $|u_z^{(i)}|$ осевого смещения в верхней центральной точке $\{r = 0, z = h_c\}$. Верхний индекс в скобках здесь означает номер варианта модулей пьезокерамики из таблицы 1, причем $i = 0$ соответствует материалу сплошной пьезокерамики (вариант 0).

Некоторые результаты расчетов приведены на рис. 3. Номера кривых 1–3 на этих рисунках означают те же типы пористой пьезокерамики, что и для рис. 2. Сплошные кривые с номерами 1–3 построены для материалов с пористостью 40%, а штриховые кривые – для материалов с пористостью 20%. Кривые зеленого цвета с номером 0 построены для материала сплошной пьезокерамики PZT-5Н. АЧХ на рис. 3 построены при различных электрических воздействиях: рис. 3а соответствует задаче с заданной осциллирующей разностью потенциалов с модулем $\Delta V = 100$ В, а рис. 3б – задаче с заданным электрическим зарядом $Q = 0,25 \cdot 10^{-6}$ Кл на одном электроде при заземленном втором электроде.

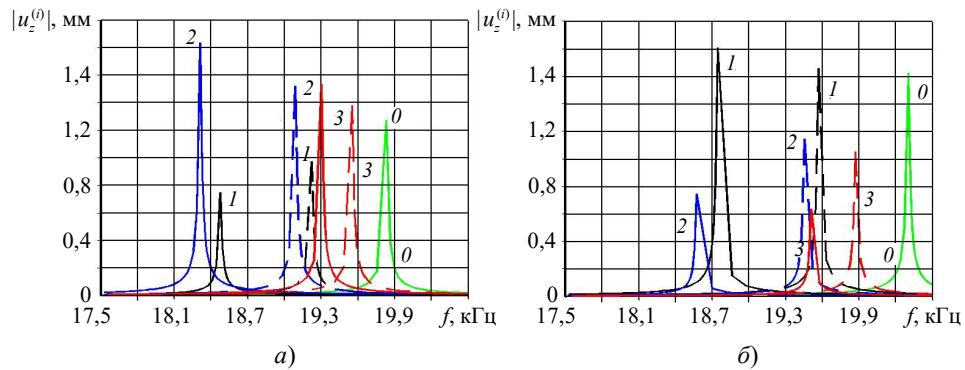


Рис. 3. Прогибы в верхней центральной точке при действии разности потенциалов (а) и при действии электрического заряда (б)

Как видно из рис. 3, зависимости от пористости максимумов амплитуд смещений в этих двух задачах достаточно сильно отличаются. Тип пористости пьезокерамики также существенно влияет на величины амплитуд колебаний. При этом, как обычно [21], в задачах с заданной разностью потенциалов амплитудные максимумы наблюдаются на частотах электрических резонансов, а в задачах с заданным зарядом – на частотах электрических антирезонансов.

В случае обычной пористой пьезокерамики (вариант 1) при задании разности потенциалов (см. рис. 3а) амплитуды максимумов осевых смещений на резонансных частотах убывают с ростом пористости. Для пористой пьезокерамики с тонкими металлизированными поверхностями пор (вариант 2) максимумы осевых перемещений возрастают при увеличении пористости. В случае пористой пьезокерамики с достаточно толстым покрытием поверхностей пор металлом (вариант 3) максимумы амплитуд осевых перемещений увеличиваются с ростом пористости, но в меньшей степени, чем для варианта 2.

Зависимости максимумов осевых перемещений становятся еще более заметными при возбуждении колебаний преобразователя электрическим зарядом (см. рис. 3б). Здесь максимумы перемещений возрастают с ростом пористости для обычной пористой пьезокерамики, но убывают для пористой пьезокерамики с металлизированными поверхностями пор. Это поведение отличается от результатов, приведенных в [19] для другой конфигурации преобразователя и для других модулей пьезокерамики.

Отметим, что во всех случаях на первых резонансных частотах осевые перемещения преобразователя в центральных торцевых областях оказываются на порядок большими по сравнению с радиальными перемещениями его боковых поверхностей. Таким образом, Сymbal-преобразователь на первой резонансной частоте эффективно генерирует осевые колебания. Кроме того, использование пористой пьезокерамики с поверхностями пор, покрытыми тонким слоем металла, повышает эффективность возбуждения колебаний на первой резонансной частоте в наибольшей степени. При этом расчеты АЧХ на более высокой резонансной частоте, соответствующей первой резонансной частоте планарных колебаний пьезоэлектрического диска, показали меньшую эффективность возбуждения осевых перемещений. Тем не менее, в целом, если еще принять во внимание меньший акустический импеданс пористой пьезокерамики по сравнению с плотной пьезокерамикой [22], то можно сделать вывод о перспективности применения рассмотренных композитных пьезокерамик в качестве активных материалов для излучателей акустических волн.

Для полноты анализа исследуем один известный недостаток Сymbal-преобразователя, связанный с концентрацией напряжений в ближней к оси симметрии точке соединения пьезоэлектрического диска с накладкой $A(R_2, h_d/2)$, показанной на рис. 4б стрелкой. Для обычного варианта преобразователя с плотной пьезокерамикой этот вопрос с учетом клеевых слоев между диском и накладками изучался в [4, 23, 24] и в других публикациях этих авторов. Здесь клеевые слои не рассматривались, и можно предположить, что эти слои не будут оказывать влияния при качественном сравнении Сymbal-преобразователей с дисками, выполненными из различных пористых пьезокерамик.

На рис. 4а приведены АЧХ эквивалентных напряжений по Мизесу в точке A пьезоэлектрического диска для тех же вариантов пьезокерамик и при тех же входных данных задачи, что и для рис. 3а. Распределение мнимых значений эквивалентных напряжений по Мизесу для второго варианта пористой пьезокерамики с пористостью 40% для первой резонансной частоты показано на рис. 4б. Из этого рисунка видно, что в точке A действительно наблюдается концентрация напряжений, которая важна для оценки прочности соединения различных частей конструкции и ограничивает использование преобразователя на резонансных частотах относительно низкими управляющими электрическими напряжениями [4, 24].

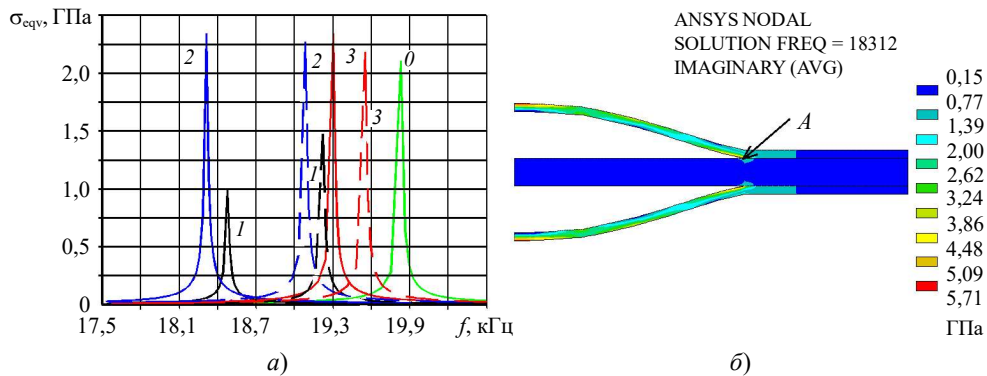


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по Мизесу в месте концентрации напряжений в диске (а) и распределение мнимых частей напряжений на резонансной частоте для варианта 2 (б)

Сравнение рис. 4а и рис. 3а показывает, что, как и следовало ожидать, резонансы перемещений являются и резонансами для механических напряжений [4, 24]. Но интересно то, что в сравнении с базовым преобразователем с плотной керамикой максимумы напряжений для преобразователей с различными вариантами пористой керамики с металлизацией поверхностей пор в процентном отношении отличаются даже меньше, чем аналогичные максимумы для смещений. Таким образом, можно сделать вывод, что если исходный вариант Сymbal-преобразователя с диском из плотной керамики является подходящим для использования в качестве излучателя, то и Сymbal-преобразователи с диском из пористой пьезокерамики будут пригодными для использования.

Аналогичный вывод по поводу влияния концентраторов напряжений можно сделать и для Сymbal-преобразователя, работающего в качестве генератора возобновляемой энергии.

Заключение

Методами компьютерного моделирования исследован Сymbal-пьезопреобразователь, состоящий из пьезокерамического диска с двумя тарельчатыми металлическими накладками. В качестве активного материала преобразователя были проанализированы как обычная пористая пьезокерамика, так и пористая пьезокерамика с полностью металлизированными поверхностями пор с эффективными модулями, рассчитанными в [18].

Рассмотрено два вида Сymbal-пьезопреобразователей. Первый преобразователь предназначен для эксплуатации в качестве пьезогенератора «зеленой энергии». Он имел более жесткие накладки и при низкочастотных механических воздействиях генерировал в преобразователе электрические поля. Для этого устройства использование пористой керамики показало меньшую эффективность электромеханического преобразования по сравнению с плотной керамикой, но применение пористой керамики с металлизированными поверхностями пор дало лучшие результаты, особенно при достаточно высокой пористости (40%) и при тонком металлическом покрытии.

Второй тип преобразователя работал как излучатель акустических волн. Он имел менее жесткие накладки и преобразовывал электрические воздействия вблизи первой резонансной частоты в механические колебания. В этом случае при возбуждении преобразователя разностью потенциалов на первых частотах электрических резонансов

были получены качественно аналогичные результаты по применению пористых пьезокерамик, что и для Сymbal-пьезогенератора.

Таким образом, проведенный конечно-элементный анализ в ANSYS показал эффективность использования материалов пористой пьезокерамики с металлизированными поверхностями пор как для преобразователя, предназначенного для сохранения энергии при механических воздействиях, так и для преобразователя, работающего в режиме генерирования акустических волн при электрических воздействиях.

Меняя геометрические размеры, материалы накладок, пористость пьезокерамики и структуру металлизации поверхностей пор, а также условия закрепления, можно варьировать параметры преобразователя в достаточно широких пределах и достигать оптимальных характеристик для различных ультразвуковых и пьезотехнических применений.

Список литературы

1. Rolt K.D. History of the flextensional electroacoustic transducers. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1990. Vol. 87. Iss. 3. P. 1340–1349. DOI: 10.1121/1.399507.
2. Zhang J., Hughes W.J., Bouchilloux P., Meyer R.J., Uchino K., Newnham R.E. A class V flextensional transducer: the cymbal. *Ultrasonics*. 1999. Vol. 37. Iss. 6. P. 387–393. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00021-9).
3. Dogan A., Uchino K., Newnham R.E. Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps “cymbal”. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1997. Vol. 44. Iss. 3. P. 597–605. DOI: 10.1109/58.658312.
4. Ochoa P., Pons J.L., Villegas M., Fernandez J.F. Advantages and limitations of cymbals for sensor and actuator applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2006. Vol. 132. P. 63–69. DOI: 10.1016/j.sna.2006.05.031.
5. Ochoa P., Villegas M., Fernandez J.F. Effective piezoelectric coefficient calculation of cymbal piezocomposite. *Ferroelectrics*. 2002. Vol. 273. Iss. 1. P. 315–320. DOI: 10.1080/00150190211775.
6. Wang L., Li D., Wu M., Jia M., Ju W. The analysis of cymbal transducer's effective piezoelectric coefficients based on ANSYS. *Integrated Ferroelectrics*. 2006. Vol. 80. Iss. 1. P. 297–302. DOI: 10.1080/10584580600659852.
7. Guo S., Li W., Sang L., Sun Ch., Zhao X.Z. Finite element analysis of underwater cymbal transducers with large displacement and fast response time. *Integrated Ferroelectrics*. 2006. Vol. 78. Iss. 1. P. 103–111. DOI: 10.1080/10584580600660025.
8. Tressler J.F., Cao W., Uchino K., Newnham R.E. Finite element analysis of the cymbal-type flextensional transducer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1998. Vol. 45. Iss. 5. P. 1363–1369. DOI: 10.1109/58.726463.
9. Li T., Lee P.S. Piezoelectric energy harvesting technology: From materials, structures, to applications. *Small Structures*. 2022. Vol. 3. Iss. 3. Article No 2100128. DOI: 10.1002/ssr.202100128.
10. Yang Z., Zhou S., Zu J., Inman D. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*. 2018. Vol. 2. Iss. 4. P. 642–697. DOI: 10.1016/j.joule.2018.03.011.
11. Kim H.W., Batra A., Priya S., Uchino K., Markley D., Newnham R.E., Hofmann H.F. Energy harvesting using a piezoelectric “cymbal” transducer in dynamic environment. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2004. Vol. 43. P. 6178–6283. DOI: 10.1143/JJAP.43.6178.
12. Kim H.W., Priya S., Uchino K. Modeling of piezoelectric energy harvesting using cymbal transducers. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 45. P. 5836–5840. DOI: 10.1143/JJAP.45.5836.
13. Mo C., Arnold D., Kinsel W.C., Clark W.W. Modeling and experimental validation of unimorph piezoelectric cymbal design in energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2013. Vol. 24. Iss. 7. P. 828–836. DOI: 10.1177/1045389X12463459.
14. Moure A., Izquierdo Rodriguez M.A., Rueda S.H., Gonzalo A., Rubio-Marcos F., Cuadros D.U., Pérez-Lepe A., Fernández J.F. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for

vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 112. P. 246–253. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.01.030.

15. Tufekcioglu E., Dogan A. A flextensional piezo-composite structure for energy harvesting applications. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 216. P. 355–363. DOI: 10.1016/j.sna.2014.06.001.

16. Nasedkin A., Nasedkina A., Rybyanets A. Finite element simulation of effective properties of microporous piezoceramic material with metallized pore surfaces. *Ferroelectrics*. 2017. Vol. 508. Iss. 1. P. 100–107. DOI: 10.1080/00150193.2017.1289569.

17. Nasedkin A., Nassar M.E. About anomalous properties of porous piezoceramic materials with metalized or rigid surfaces of pores. *Mechanics of Materials*. 2021. Vol. 162. Article No 104040. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.104040.

18. Nasedkin A., Nassar M.E. A numerical study about effects of metal volume fraction on effective properties of porous piezoelectric composite with metalized pore boundaries. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022. Vol. 29. Iss. 25. P. 4359–4372. DOI: 10.1080/15376494.2021.1928346.

19. Nasedkin A.V., Nasedkina A.A., Rajagopal A. Analysis of cymbal transducer from porous piezoceramics PZT-4 with various material properties based on ANSYS. *Advanced Materials. PHENMA 2017. Springer Proceedings in Physics*. Vol. 207. Eds. I.A. Parinov, S.-H. Chang, V.K. Gupta. Cham: Springer, 2018. Ch. 42. P. 533–547. DOI: 10.1007/978-3-319-78919-4_42.

20. Kaltenbacher M. *Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators: Finite Elements for Computational Multiphysics*. Berlin–Heidelberg: Springer, 2015. 587 p. DOI: 10.1007/978-3-642-40170-1.

21. Наседкин А.В. *Моделирование пьезоэлектрических преобразователей в ANSYS: Учеб. пособие*. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. 176 с. <http://elibrary.ru/item.asp?id=25433397>.

22. Levassort F., Holc J., Ringgaard E., Bove T., Kosec M., Lethiecq M. Fabrication, modelling and use of porous ceramics for ultrasonic transducer applications. *Journal of Electroceramics*. 2007. Vol. 19. Iss. 1. P. 127–139. DOI: 10.1007/s10832-007-9117-3.

23. Ochoa P., Pons J.L., Villegas M., Fernandez J.F. Effect of bonding layer on the electro-mechanical response of the cymbal metal-ceramic piezocomposite. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27. Iss. 2-3. P. 1143–1149. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.022.

24. Ochoa P., Pons J.L., Villegas M., Fernandez J.F. Mechanical stress and electric potential in cymbal piezoceramics by FEA. *Journal of the European Ceramic Society*. 2005. Vol. 25. Iss. 12. P. 2457–2461. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.082.

References

1. Rolt K.D. History of the flextensional electroacoustic transducers. *J. Acoust. Soc. Am*. 1990. Vol. 87. Iss. 3. P. 1340–1349. DOI: 10.1121/1.399507.

2. Zhang J., Hughes W.J., Bouchilloux P., Meyer R.J., Uchino K., Newnham R.E. A class V flextensional transducer: the cymbal. *Ultrasonics*. 1999. Vol. 37, Iss. 6. P. 387–393. [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(99\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(99)00021-9).

3. Dogan A., Uchino K., Newnham R.E. Composite piezoelectric transducer with truncated conical endcaps “cymbal”. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1997. Vol. 44. Iss. 3. P. 597–605. DOI: 10.1109/58.658312.

4. Ochoa P., Pons J.L., Villegas M., Fernandez J.F. Advantages and limitations of cymbals for sensor and actuator applications. *Sens. Actuators A Phys*. 2006. Vol. 132. P. 63–69. DOI: 10.1016/j.sna.2006.05.031.

5. Ochoa P., Villegas M., Fernandez J.F. Effective piezoelectric coefficient calculation of cymbal piezocomposite. *Ferroelectrics*. 2002. Vol. 273. Iss. 1. P. 315–320. DOI: 10.1080/00150190211775.

6. Wang L., Li D., Wu M., Jia M., Ju W. The analysis of cymbal transducer's effective piezoelectric coefficients based on ANSYS. *Integr. Ferroelectr*. 2006. Vol. 80. Iss. 1. P. 297–302. DOI: 10.1080/10584580600659852.

7. Guo S., Li W., Sang L., Sun Ch., Zhao X.Z. Finite element analysis of underwater cymbal transducers with large displacement and fast response time. *Integr. Ferroelectr*. 2006. Vol. 78. Iss. 1. P. 103–111. DOI: 10.1080/10584580600660025.

8. Tressler J.F., Cao W., Uchino K., Newnham R.E. Finite element analysis of the cymbal-type flextensional transducer. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 1998. Vol. 45. Iss. 5. P. 1363–1369. DOI: 10.1109/58.726463.
9. Li T., Lee P.S. Piezoelectric energy harvesting technology: From materials, structures, to applications. *Small Structures*. 2022. Vol. 3. Iss. 3. Article No 2100128. DOI: 10.1002/ssstr.202100128.
10. Yang Z., Zhou S., Zu J., Inman D. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications. *Joule*. 2018. Vol. 2. Iss. 4. P. 642–697. DOI: 10.1016/j.joule.2018.03.011.
11. Kim H.W., Batra A., Priya S., Uchino K., Markley D., Newnham R.E., Hofmann H.F. Energy harvesting using a piezoelectric “cymbal” transducer in dynamic environment. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2004. Vol. 43. P. 6178–6283. DOI: 10.1143/JJAP.43.6178.
12. Kim H.W., Priya S., Uchino K. Modeling of piezoelectric energy harvesting using cymbal transducers. *Jpn. Appl. Phys.* 2006. Vol. 45. P. 5836–5840. DOI: 10.1143/JJAP.45.5836.
13. Mo C., Arnold D., Kinsel W.C., Clark W.W. Modeling and experimental validation of unimorph piezoelectric cymbal design in energy harvesting. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 2013. Vol. 24. Iss. 7. P. 828–836. DOI: 10.1177/1045389X12463459.
14. Moure A., Izquierdo Rodríguez M.A., Rueda S.H., Gonzalo A., Rubio-Marcos F., Cuadros D.U., Pérez-Lepe A., Fernández J.F. Feasible integration in asphalt of piezoelectric cymbals for vibration energy harvesting. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 112. P. 246–253.
15. Tufekcioglu E., Dogan A. A flextensional piezo-composite structure for energy harvesting applications. *Sens. Actuator A. Phys.* 2014. Vol. 216. P. 355–363. DOI: 10.1016/j.sna.2014.06.001.
16. Nasedkin A., Nasedkina A., Rybyanets A. Finite element simulation of effective properties of microporous piezoceramic material with metallized pore surfaces. *Ferroelectrics*. 2017. Vol. 508. Iss. 1. P. 100–107. DOI: 10.1080/00150193.2017.1289569.
17. Nasedkin A., Nassar M.E. About anomalous properties of porous piezoceramic materials with metallized or rigid surfaces of pores. *Mech. Mater.* 2021. Vol. 162. Article No 104040. DOI: 10.1016/j.mechmat.2021.104040.
18. Nasedkin A., Nassar M.E. A numerical study about effects of metal volume fraction on effective properties of porous piezoelectric composite with metallized pore boundaries. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2022. Vol. 29. Iss. 25. P. 4359–4372. DOI: 10.1080/15376494.2021.1928346.
19. Nasedkin A.V., Nasedkina A.A., Rajagopal A. Analysis of cymbal transducer from porous piezoceramics PZT-4 with various material properties based on ANSYS. *Advanced Materials. PHENMA 2017. Springer Proceedings in Physics*. Vol. 207. Eds. I.A. Parinov, S.-H. Chang, V.K. Gupta. Cham. Springer. 2018. Ch. 42. P. 53–547. DOI: 10.1007/978-3-319-78919-4_42.
20. Kaltenbacher M. *Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators: Finite Elements for Computational Multiphysics*. Berlin. Heidelberg. Springer. 2015. 587 p. DOI: 10.1007/978-3-642-40170-1.
21. Nasedkin A.V. *Modelirovanie pyezoelektricheskikh preobrazovateley v ANSYS: Uchebnoe posobie. [Modeling of Piezoelectric Transducers in ANSYS]*. Rostov on Don. SFdU Publ. 2015. 176 p. (In Russian).
22. Levassort F., Holc J., Ringgaard E., Bove T., Kosec M., Lethiecq M. Fabrication, modelling and use of porous ceramics for ultrasonic transducer applications. *J. Electroceram.* 2007. Vol. 19. Iss. 1. P. 127–139. DOI: 10.1007/s10832-007-9117-3.
23. Ochoa P., Pons J.L., Villegas M., Fernandez J.F. Effect of bonding layer on the electro-mechanical response of the cymbal metal-ceramic piezocomposite. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2007. Vol. 27. Iss. 2-3. P. 1143–1149. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.022.
24. Ochoa P., Pons J.L., Villegas M., Fernandez J.F. Mechanical stress and electric potential in cymbal piezoceramics by FEA. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2005. Vol. 25. Iss. 12. P. 2457–2461. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2005.03.082.

**FINITE ELEMENT CALCULATION OF DISK TRANSDUCER
WITH CYMBAL-SHAPED END-CAPS AND ACTIVE ELEMENT FROM POROUS
PIEZOCERAMICS WITH EXTREME CONDUCTIVITY OF PORE SURFACES***

Nasedkin A.V.¹, Nasedkina A.A.¹, Nassar M.E.^{1,2}

¹*Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation*

²*Menoufia University, Menouf, Egypt*

nasedkin@math.sfedu.ru

Received by the Editor 2022/11/17

The paper presents a finite element analysis of a disk-shaped piezoelectric transducer with end-cap patches, which is usually called as Cymbal transducer. The efficiency of such a transducer is determined both by its geometric dimensions and by the values of the longitudinal and transverse piezoelectric moduli (piezoelectric charge coefficients) of the piezoceramic disc material. As was recently found, for porous piezoceramics with completely metallized pore surfaces, the effective transverse piezoelectric modulus does not decrease in absolute value with increasing porosity, as in conventional porous piezoceramics, but, on the contrary, increases, as does the longitudinal piezoelectric modulus. These unusual properties of porous piezoceramics with pore surface metallization are determined by the extreme properties of the phases that make up the piezocomposite material, and, in particular, the extremely high conductivity of the pore surface material inside the dielectric composite medium. In this regard, the main task was to study the efficiency of the Cymbal transducer depending on the type of porous piezoelectric disc material. Comparisons were made for solid piezoceramics, for ordinary porous piezoceramics, for porous piezoceramics with a very thin metal coating of the pores, and for porous piezoceramics with a relatively thick metallization layer on the surface of the pores with different porosities. In the ANSYS finite element package, steady-state oscillations of the cymbal transducer were calculated under nonresonant operating modes and near the first electrically active frequencies, which corresponds to the use of the transducer as a device for energy harvester and as a piezoelectric emitter of acoustic waves. In both cases, the results of computational experiments showed the promise of using new types of porous piezoceramic materials for the considered configurations of a disk piezoelectric transducer with end-cap cymbal patches. In this case, the best results were obtained for a porous piezoceramic material with a very thin metal coating of the pores.

Keywords: piezoelectricity, flexible piezoelectric transducer, porous piezoceramics, pore surface metallization, resonant frequency, actuator, piezoelectric generator, finite element method.

*This study was supported by the Russian Science Foundation, grant number No 22-11-00302, <https://rscf.ru/project/22-11-00302/>, at the Southern Federal University.