

## Повышение эффективности работы линейного пьезоэлектрического мотора сканирующего зондового микроскопа

В.Я. Гальченко, С.А. Филимонов, А.В. Батраченко, Н.В. Филимонова\*

Черкасский государственный технологический университет, ул. Шевченко, 460, 18006 Черкассы, Украина

(Получено 12.04.2018; опубликовано online 25.08.2018)

Работа посвящена актуальным вопросам совершенствования линейных пьезокерамических моторов сканирующих зондовых микроскопов. Описываются особенности конструирования пьезоэлектрических моторов, а именно согласование формы и геометрических параметров толкателя с пьезокерамической пластиной (статором). Определено рациональное отношение длины вершины толкателя к длине его основания. Установлена рациональная высота  $h$  конусного толкателя линейного пьезоэлектрического мотора. Результаты исследований позволили увеличить амплитуду колебаний статора линейного пьезоэлектрического мотора в 4,5 раза. Адекватность модельных расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями. Полученные результаты могут использоваться при проектировании пьезоэлектрических моторов.

**Ключевые слова:** Пьезокерамика, Пьезоэлектрический мотор, Толкатель, Моделирование.

DOI: [10.21272/jnep.10\(4\).04025](https://doi.org/10.21272/jnep.10(4).04025)

PACS numbers: 77.65.Bn, 62.20.dq

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Пьезоэлектрические моторы применяются в производстве полупроводников и их тестировании, проверке подложек, для нанолитографии, нанопринтинга, нанометрологии, где в сканирующих зондовых микроскопах пьезоэлементы исполняют роль точных позиционирующих устройств, в устройствах активной компенсации вибраций, в космических аппаратах в качестве исполнительных механизмов, а также для работы в условиях наличия сильных магнитных полей (см., например, [1]).

Пьезоэлектрическим мотором называется электрический двигатель, в котором механическое перемещение ведомого органа (ротора или якоря) осуществляется за счет пьезоэлектрического или пьезомеханического эффекта [2].

Актуальность применения пьезоэлектрических моторов в различных прецизионных измерительных и следящих системах, регулируемых величинами которых являются угловое и линейные перемещения, объясняется несколькими факторами. Это, прежде всего, их высокая разрешающая способность (вплоть до 0,1 нм), возможность самостопорения приводимого звена, максимальная длительность безотказной работы, а также их высокая надежность. Пьезоэлектрические моторы обладают рядом преимуществ над электромагнитными: отсутствием излучаемых магнитных полей и неподверженностью к их влиянию; возможностью миниатюризации; широким диапазоном частот вращения и моментов на валу; огнестойкостью; отсутствием обмоток; простой технологией изготовления и, как следствие, более высокой эффективностью. В то же время за внешней конструктивной простотой пьезоэлектрического мотора скрывается целый ряд физических явлений, которые сложным образом взаимосвязаны между собой [3]. Трудности из совместного учета существенно сдерживают развитие и совершенствование данного вида двигателей.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Различают пьезоэлектрические моторы линейного и вращательного типов. В данной статье рассматриваются линейные пьезоэлектрические моторы.

Одним из наиболее распространенных типов линейных пьезоэлектрических моторов является конструкция немецкой компании Physik Instrumente (PI) [4]. Основными элементами этого пьезоэлектрического мотора (Рис. 1) являются: прямоугольная монолитная пьезоэлектрическая пластина (статор) 1 с электродами 2, 3; фрикционный наконечник (толкатель) 4, а также каретка (ротор, который на рисунке не показан). Электрод 2 разделен на две секции 5, 6. Толкатель и пластина представляют собой цельную конструкцию, выполненную из пьезоэлектрического материала. Пьезоэлектрическая пластина со стороны 7 под действием внешней силы  $F$  прижимается к каретке. Толкатель представляет собой концентратор механических колебаний. Основная задача концентратора состоит в увеличении амплитуды колебаний пьезоэлектрической пластины, значение которой находится в пределах 0,001-1 мкм, чего недостаточно для осуществления толкания каретки. В соответствии с формой образующей концентратора разделяются на конусные, экспоненциальные, катеноидальные, ступенчатые и ампульные [4]. По технологическим причинам наиболее оптимальной формой толкателя является конусная.

Пьезоэлектрический мотор работает следующим образом (рис. 1). Управляющее напряжение прикладывается на одну из секций 5 или 6 электрода 2, что зависит от выбранного направления движения каретки, и на противоположный электрод 3, являющийся общим ("земляным"). В данной конструкции пьезомотора для получения линейного перемещения каретки в толкателе возбуждаются колебания по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

\* [s.filimonov@chdtu.edu.ua](mailto:s.filimonov@chdtu.edu.ua)

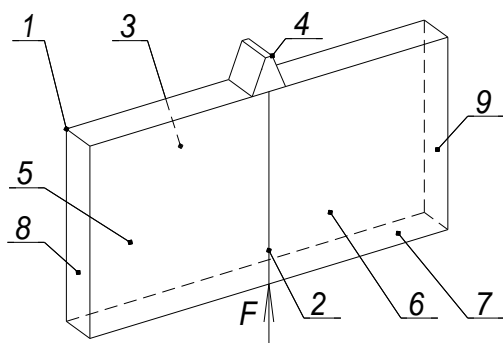


Рис. 1 – Пьезокерамическая пластина линейного пьезоэлектрического мотора компании Physik Instrumente

При этом продольные колебания в толкателе возбуждаются за счет продольных колебаний пьезопластины (статора), а поперечные изгибные колебания – механическим путем, за счет взаимодействия толкателя с поверхностью каретки. Таким образом, толкатель начинает выполнять колебания в форме эллипса и проталкивать каретку (рис. 2). Основным недостатком такого линейного пьезоэлектрического мотора является сложное согласование формы и геометрических параметров толкателя с пьезокерамической пластиной (статором) для максимальной передачи энергии каретке [5].

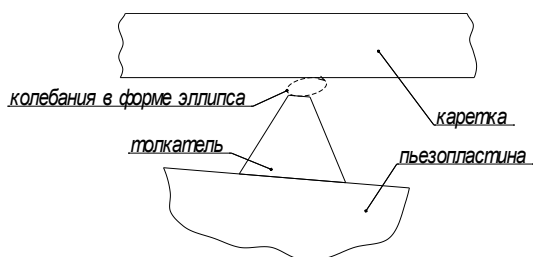


Рис. 2 – Колебания толкателя линейного пьезоэлектрического мотора

Анализ технической литературы, научных статей, а также патентов, показал, что в имеющихся работах не рассматривается выбор параметров толкателя линейного пьезокерамического двигателя. Таким образом, определение рациональных параметров толкателя линейного пьезокерамического двигателя является важной и актуальной задачей, и ее решение является целью данной работы.

### 3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Известны математические зависимости для расчета пьезокерамических элементов стандартных форм (пластина, диск, кольцо, брусок и стержень) без мелких конструктивных деталей на них [6]. Однако такие методы расчета не позволяют визуализировать форму колебания всего пьезокерамического элемента, а это значит, не делают возможным определение приемлемой формы его колебаний.

Учитывая технические особенности пьезоэлектрических двигателей, затрудняющие экспериментальное определение и выбор правильной формы их колебаний, оптимальным является использование с

этой целью численных методов расчета, реализуемых специализированными САПР.

Для исследования влияния конструктивных параметров толкателя линейного пьезоэлектрического мотора было проведено численное моделирование процесса работы пьезоэлемента с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics 3.5. COMSOL Multiphysics – это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов многих научных и инженерных задач, основанных на решении дифференциальных уравнений в частных производных (PDE) методом конечных элементов. Этот программный пакет с применением для расчета мультифизических моделей расширяет возможности моделирования связанных между собой физических явлений. Расчет не требует глубоких знаний по математической физике и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: механические напряжения, напряженность электрического поля и других, в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений выполняется автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом через графический интерфейс пользователя (GUI) или программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script, или на языке MATLAB. В рамках этих исследований для работы с программой использовался только графический интерфейс.

Интерфейс пьезоэлектрических устройств объединяет функции моделирования COMSOL модулей механики твердого тела и электростатики COMSOL's Solid Mechanics and Electrostatics в один инструмент для моделирования пьезоэлектрических материалов. Моделирование пьезоэлектрических устройств в COMSOL Multiphysics 3.5 осуществляется при помощи модуля Piezoelectric Effects. Работа пьезоэлектрических моторов основана на обратном пьезоэффекте, поэтому в модуле Piezoelectric Effects выбирается режим Stress-Charge Form.

Внутри пьезоэлектрического элемента существует связь между деформацией и электрическим полем, которая определяется материальным или конститутивным соотношением:

$$\begin{aligned} T &= c_E S - e^T E, \\ D &= e S + \varepsilon_S E, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $S$  – деформация,  $T$  – напряжение,  $E$  – электрическое поле,  $D$  – электрическое смещение поля.

Параметры материала  $c_E$ ,  $e$  и  $\varepsilon_S$  соответствуют жесткости материала, коэффициенту электромеханической связи и диэлектрической проницаемости. Эти величины являются тензорами 4, 3 и 2 ранга соответственно, но, поскольку тензоры симметричны по физическим причинам, они могут быть представлены в виде матриц в сокращенной записи, что обычно более удобно [8].

Использовались лагранжевы конечные элементы с элементарными базисными функциями второго порядка – Lagrange-Quadratic.

Анализ линейного пьезокерамического двигателя осуществлялся в режиме Frequency response. Расчетная сетка конечных элементов в пункте «Mesh» выбирается ортогонализированной – Normal. Таким образом, исследуемая трехмерная модель представлена совокупностью из 870 элементов, полученных в результате построения сетки с тетрагональным разбиением. В качестве решателя используется Direct, в котором выбран численный метод SPOOLES для решения систем линейных уравнений с разреженными матрицами.

Для моделирования использовались такие выходные данные пьезокерамической пластины: длина – 40, ширина – 20, толщина – 3 мм, материал пьезокерамики – PZT-5Н. Геометрия типов толкателя представлена на рис. 4.

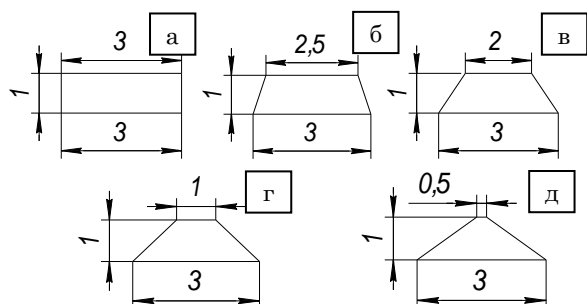


Рис. 4 – Типы исследуемых толкателей линейного пьезоэлектрического мотора: тип 1 (а); тип 2 (б); тип 3 (в); тип 4 (г); тип 5 (д)

Размеры толкателя (рис. 4) представлены коэффициентами  $K = c/a$  в безразмерной форме, полученной в результате отношения длины вершины  $c$  толкателя к длине его основания  $a$ . Таким образом, для рис. 4а –  $K=1$ , для рис. 4б, в, г, д –  $K=0,83$ ,  $K=0,67$ ,  $K=0,33$ ,  $K=0,17$  соответственно.

Граничные условия для модели пьезоэлектрического мотора следующие: пьезокерамическая пластина 1 по ширине с обеих сторон 8, 9 (Рис. 1) имеет тип граничных условий Roller; электрическое напряжение (Electric potential) 100В приложено к секционированному электроду 5, а земля (Ground) ко всему электроду 3 на противоположной стороне.

При проведении численного моделирования в пакете программ COMSOL Multiphysics сначала определялась частота резонанса, на которой пьезокерамический элемент, а именно толкатель, приобретает колебания эллиптической формы. Затем, при изменении формы (геометрии) толкателя определялись его колебания максимальной амплитуды, и осуществлялся выбор рационального отношения длины вершины толкателя к длине его основания. В завершение проводились исследования по выбору рациональной высоты толкателя.

Также проводились экспериментальные исследования с целью проверки адекватности полученных при моделировании результатов. На рис. 5 иллюстрируется схематическое представление экспериментального линейного пьезоэлектрического мотора.

Методика проведения экспериментов заключается в следующем. Пьезоэлектрическая пластина 1

совместно с концентратором 2 закрепляется таким образом, чтобы она была зафиксирована с противоположных сторон по ширине 3, 4 через демпфирующие резиновые прокладки 5, 6. Концентратор 2 пьезоэлектрической пластины 1 жестко упирается в направляющую качения (каретку) 7 за счет силы прижатия  $F$ , действующей с противоположной стороны и создаваемой пластинчатой пружиной. Сила прижатия может изменяться с помощью регулировочных винтов.

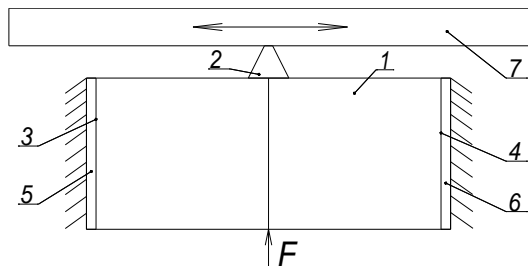


Рис. 5 – Схематическое представление экспериментального линейного пьезоэлектрического мотора

#### 4. ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты численного моделирования пьезокерамического элемента линейного мотора представлены на рис. 6.

В результате моделирования была определена резонансная частота колебаний равная 74,4 кГц, которая соответствует эллиптической форме колебания толкателя

Полученные результаты численного моделирования представлены в графическом виде зависимостями амплитуды колебаний от коэффициента  $K$  толкателя и его высоты приведены на рис. 7.

Максимальная амплитуда колебаний толкателя составила 70 мкм при  $K=1$ . Однако использование толкателя такой формы может привести к неопределенности в направлении проталкивания каретки, а также может привести к заклиниванию толкателя. Поэтому было определено, что рациональным является отношение  $K=0,33$ , при котором амплитуда колебания составляет 33 мкм. Полученная в результате численного моделирования графическая зависимость для амплитуды колебаний толкателя была аппроксимирована с применением метода наименьших квадратов функцией полинома третьего порядка

$$\delta = a + bx + cx^2 + dx^3, \quad (2)$$

где  $\delta$  – амплитуда колебания толкателя,  $x$  – коэффициент  $K$  толкателя,  $a = -106,86781$ ,  $b = 950,56976$ ,  $c = -1981,1236$ ,  $d = 1206,5824$  – коэффициенты.

После выбора геометрии толкателя была определена его рациональная высота. Для этого при моделировании этот параметр варьировался в диапазоне от 1 до 5 мм с шагом 1 мм. Увеличение высоты толкателя выше 5 мм приводит к большим механическим напряжениям в его основании, что может привести к его разрушению. Очевидно, что рациональной высотой толкателя является 3 мм, при этом амплитуда его колебаний составила 150 мкм.

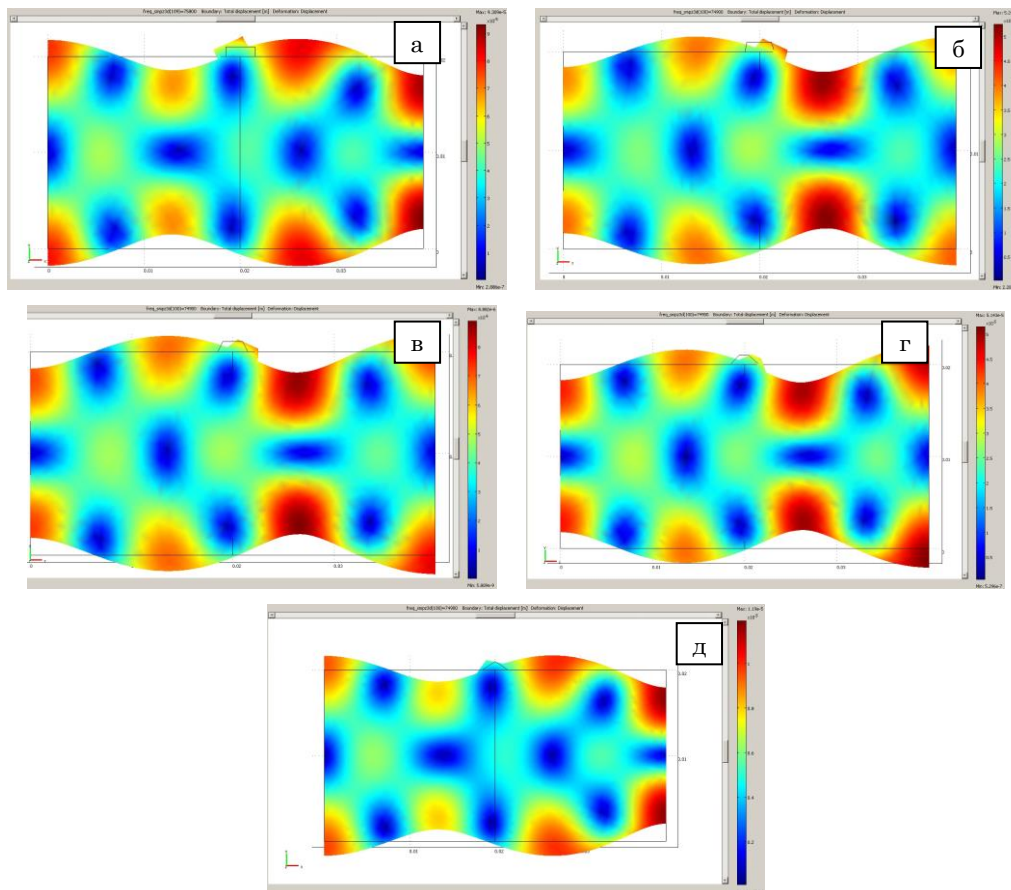


Рис. 6 – Результаты моделирования линейного пьезоэлектрического мотора с разными отношениями длины вершины толкателя к длине его основания:  $K = 1$  (а);  $K = 0,83$  (б);  $K = 0,67$  (в);  $K = 0,33$  (г);  $K = 0,17$  (д)

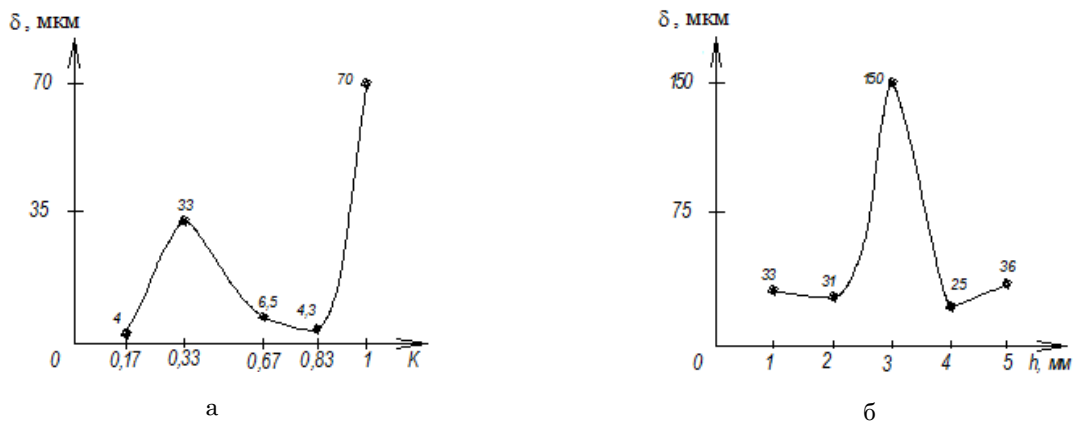


Рис. 7 – Зависимость амплитуды колебаний толкателя от коэффициента толкателя  $K$  (а) и от его высоты  $h$  при коэффициенте  $K = 0,33$  (б)

Зависимость, представленная на данном рисунке, была аппроксимирована функцией Гаусса, которая имеет вид:

$$\delta = ae^{-\frac{(h-b)^2}{2c^2}}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – амплитуда колебаний толкателя,  $h$  – высота толкателя,  $a = 149.955$ ,  $b = 2.969$ ,  $c = 0.551$  – коэффициенты.

Эта модель является адекватной в диапазоне изменения высоты толкателя от 2 до 4 мм. По опреде-

ленным рациональным размерам толкателя был изготовлен экспериментальный образец линейного пьезокерамического мотора.

### 5. ВЫВОДЫ

Основные результаты исследований следующие. Путем численного моделирования процесса функционирования линейного пьезокерамического мотора было определено рациональное отношение длины вершины толкателя к длине его основания, которое составляет  $K = 0,33$ . Данной геометрии толкателя

соответствует амплитуда колебаний  $\delta = 33$  мкм.

Установлено рациональное значение высоты  $h$  конусного толкателя линейного пьезокерамического мотора, которое равно 3 мм, при этом амплитуда  $\delta$  колебаний составляет 150 мкм.

Результаты исследований позволили увеличить амплитуду колебаний толкателя линейного пьезокерамического мотора в 4,5 раза.

Полученные данные можно использовать при проектировании пьезокерамических моторов.

## Increase the Efficiency of the Linear Piezoelectric Motor

V.Ya. Halchenko, S.A. Filimonov, A.V. Batrachenko, N.V. Filimonova

*Cherkasy State Technological University, 460, Shevchenko Str., 18006 Cherkasy, Ukraine*

The work is devoted to topical issues of improving linear piezoceramic motors, scanning probe microscopes. Peculiarities of designing piezoelectric motors, namely the coordination of the shape and geometric parameters of the pusher with a piezoceramic plate (stator) are described. The rational ratio of the length of the pusher top to the length of its base is determined. The rational height  $h$  of the coaxial pusher of a linear piezoceramic motor is established. The results of the investigations made it possible to increase the oscillation amplitude of the stator of a linear piezoceramic motor by a factor of 4.5. The adequacy of model calculations is confirmed by experimental studies. The results obtained can be used in the design of piezoceramic motors.

**Keywords:** Piezoceramics, Piezoceramic motor, Pusher, Simulation.

## Підвищення ефективності роботи лінійного п'єзоелектричного мотора

В.Я. Гальченко, С.О. Філімонов О.В. Батраченко Н.В. Філімонова

*Черкаський державний технологічний університет, вул. Шевченка, 460, 18006 Черкаси, Україна*

Робота присвячена актуальним питанням удосконалення лінійних п'єзокерамічних моторів скануючих зондових мікроскопів. Описуються особливості конструювання п'єзоелектричних моторів, а саме узгодження форми і геометричних параметрів штовхача з п'єзокерамічної пластиною (статором). Визначено умови раціонального відношення довжини вершини штовхача до довжини його основи. Встановлено раціональна висота  $h$  конусного штовхача лінійного п'єзокерамічного мотора. Результати досліджень дозволили збільшити амплітуду коливань статора лінійного п'єзокерамічного мотора в 4,5 рази. Адекватність модельних розрахунків підтверджена експериментальними дослідженнями. Отримані результати можуть використовуватися при проектуванні п'єзокерамічних моторів.

**Ключові слова:** П'єзокераміка, П'єзокерамічний мотор, Штовхач, Моделювання.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Sharapov, *Piezoceramic sensors* (New York: Springer Verlag: 2011).
2. С.Ф. Петренко, *Пьезоэлектрический двигатель* (Киев: Корнійчук: 2002) (S.F. Petrenko, *P'ezoelektrycheskiy dvihatel* (Kiev: Korniyuchuk: 2002)) [In Russian].
3. А.Б. Смирнов, *Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами* (СПб: СПбГПУ: 2003) (A.B. Smirnov, *Mekhatronika i robototekhnika. Sistemy mikroperemeshcheniy s p'ezoelektrycheskimi privodami* (SPb: SPbGPU: 2003)) [In Russian].
4. В.Н. Хмелев, *Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции* (Бийск: АГТУ: 2013) (V.N. Khmelev, *Istochniki ul'trazvuu-kovogo vozdeystviya. Osobennosti postroyeniya i konstruktсии* (Bysk: AGTU: 2013)) [In Russian].
5. С.Ф. Петренко, С.А. Филимонов, Н.В. Филимонова, А.В. Батраченко, А.А. Лавданский, *Вісник Черкаського державного технологічного університету* **2**, 48 (2014) (S.F. Petrenko, S.A. Fylymonov, N.V. Fylymonova, A.V. Batrachenko, A.A. Lavdanskyy, *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* **2**, 48 (2014)).
6. С.Н. Жуков, *Пьезоэлектрическая керамика: принципы и применение* (Мн. ООО ФУАуинформ: 2003) (S.N. Zhukov, *P'ezoelektrycheskaya keramika: printsipy i primeneniye* (Mn. ООО FUAuinform: 2003)) [In Russian].
7. L. Spicci, M. Cati, *Comsol Conference* (Paris: 2010).