УДК 539.3:534.1

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ФОРМЕ КРУГЛОЙ ПЛАСТИНЫ С ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТАМИ¹

Соловьев А. Н.², Ле В. Зыонг³

FINITE ELEMENT MODELING AND ANALYSIS OF PIEZOELECTRIC DEVICE OF ENERGY STORAGE IN THE FORM OF A CIRCULAR PLATE WITH THE PIEZOELEMENTS

Solovyev A.N., Le V.Z.

In this paper, the three-dimensional finite element model of the energy storage device is in the form of a bimorph - circular plate fixed the contour in the device frame using piezoelectric ceramics. The device frame makes the vertical harmonic vibrations with the given amplitude and frequency. We investigate simplified accounting model of the inertial mass. By developed models directly calculated in packages ANSYS and ACELAN, the dependence of the natural frequencies and the output voltage on the geometrical dimensions, material combinations and ways to fix the inertial mass is investigated. The result of calculations offered the construction of the device, which has the greatest efficiency.

Keywords: finite element modeling, energy storage, piezoelectric, optimization, bimorph.

Введение

В последние годы большой интерес исследователей вызывают безотходные, экологически чистые способы получения электрической энергии из различных видов природных возобновляемых источников, таких как солнечный свет, ветер, морские приливы, геотермальная энергия и др. Разработка устройств накопления энергии является актуальной теоретической и технической проблемой настоящего времени. Один из типов подобных устройств может быть создан на основе использования пьезоэлектрических преобразователей энергии, подверженных внешнему вибрационному или повторяющемуся нестационарному механическому воздействию. В последнее время устройства накопления энергии, в частности пьезоэлектрические, широко изучаются [1–13].

Типичные структуры пьезоэлектрических устройств накопления энергии используют деформацию пьезоэлемента, связанную с основными режимами преобразования энергии, а именно растяжение-сжатие вдоль оси поляризации, сдвиг вдоль этой же оси и растяжение сжатие в направлении перпендикулярном оси поляризации за счет изгибной деформации устройства. Одним из важных элементов подобных устройств является инерционная масса, закрепленная непосредственно на пьезоэлементе или на некотором упругом элементе, предназначение которой обеспечить заданную амплитуду или собственную частоту колебаний активного элемента. Наиболее изученными являются устройства третьего типа, использующие в качестве конструктивного элемента консольно закрепленные балки или пластины.

В настоящей работе изучается устройство третьего типа, имеющее конструкцию круглой пластины (биморфа) с двумя тонкими симметрично расположенными пьезоактивными слоями и дисковидным центральным несущим слоем, схема такого устройства представлена на рис. 1. Использование пьезоэлектрических устройств накопления энергии с деформацией изгиба позволяет значительно повысить коэффициент преобразова-

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержки РФФИ (13-01-00196 A, 13-01-00943 A).

²Соловьев Аркадий Николаевич, д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики Донского государственного технического университета; e-mail: solovievarc@gmail.com.

³Ле Ван Зыонг, аспирант кафедры теоретической и прикладной механики Донского государственного технического университета; e-mail: leduong145@gmail.com.



Рис. 1. Схема пьезоэлектрических устройств накопления энергии конфигурации пластины: а) общая структура, б) осесимметричная модель. 1— пьезоэлемент; 2— пластина; 3— элемент инерционный; 4— соединительный слой

ния, преимущественно по заряду, при малых массах и габаритных размерах пьезопреобразователей в диапазонах низких и средних частот.

В этом типе пьезоэлектрического устройства накопления энергии используется тонкая армирующая металлическая пластина 2, с наклеенными на нее двумя дисковыми пьезокерамическими пластинами 1. Выступающая за их внешний диаметр металлическая пластина защемлена по контуру в основании корпуса. Наличие армирующей пластины повышает вибропрочность пьезоэлемента. С целью повышения коэффициента преобразования за счет снижения резонансной частоты на верхней поверхности пьезоэлемента может быть дополнительно размещен инерционный элемент 3.

Проектирование высокотехнологичных устройств накопления энергии связаны с оптимизацией геометрии и выбора материалов элементов конструкции. Эта оптимизация невозможна без построения адекватных моделей: аналитических при учете одномерных движений, конечноэлементных, когда вид внешних воздействий носит более сложный характер, упрощенных, когда деформацией отдельных элементов можно пренебречь. В работе исследуется вопрос оптимальных размеров составляющих элементов, формы пьезокерамического слоя, способов соединения инерционной массы и материалов центрального слоя, т.е. исследование влияния размеров $l_m(r_m)$, $l_p(r_p)$, $l_0(r_s)$, t_p , t_s , h_m (рис. 1) и материалов устройств (значение плотности материала) на их эффективную работу. Моделирование проводится в конечно элементных пакетах ANSYS и ACELAN.

При анализе собственных колебаний дискового изгибного преобразователя предполагается выполнение следующих электрических и механических граничных условий. Плоские поверхности пьезопластин покрыты тонкими электродами, представляющими собой эквипотенциальные поверхности. На цилиндрических поверхностях пьезопластин отсутствует нормальная компонента электрической индукции. Вся внешняя поверхность пьезопреобразователя свободна от механических напряжений.

1. Континуальные постановки задач электроупругости

Пьезоэлектрическое устройство накопления энергии конфигурации круглой пластины представляет собой составное упругое и электроупругое тело, которое совершает малые колебания в подвижной системе координат. Прямолинейное вертикальное движение этой системы (рис. 1) задается законом y(t), в соответствии с которым движется цилиндрическая поверхность армирующей пластины В этих условия достаточно адекватной математической моделью функционирования устройства является начально-краевая задача линейной теории электроупругости [13].

Рассмотрим некоторый пьезопреобразователь Ω , представленный набором областей $\Omega_j = \Omega_{pk}; \ k = 1, 2, \dots, Np; \ j = k$ со свойствами пьезоэлектрических матриалов и набором областей $\Omega_j = \Omega_{em}; \ m = 1, 2, \dots, Ne;$ j = Np + m со свойствами упругих материалов. Будем считать, что физикомеханические процессы, происходящие в средах Ω_{pk} и Ω_{em} , можно адекватно описать в рамках теорий пьезоэлектричества (электроупругости) и упругости.

Для пьезоэлектрических сред $\Omega_j = \Omega_{pk}$ предположим, что выполняются следующие полевые уравнения и определяющие соотношения

$$\rho_{pk}\ddot{\mathbf{u}} + \alpha_{dj}\rho_{j}\dot{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}_{j}; \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = 0, \ (1.1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{c}_{j}^{E} \cdot \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + \beta_{dj} \boldsymbol{\dot{\varepsilon}}) - \mathbf{e}_{j}^{T} \cdot \mathbf{E}; \mathbf{D} + \varsigma_{d} \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{e}_{j} \cdot \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} + \varsigma_{d} \boldsymbol{\dot{\varepsilon}}) + \mathbf{s}_{i}^{S} \cdot \mathbf{E},$$
(1.2)

$$\varepsilon = \frac{\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^{\mathrm{T}}}{2}; \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \qquad (1.3)$$

где $\rho(x)$ — плотность материала; $\mathbf{u}(x,t)$ вектор-функция перемещений; σ — тензор механических напряжений; **f** — вектор плотности массовых сил; \mathbf{D} — трехмерный вектор индукции электрического поля; \mathbf{c}_{i}^{E} — тензор четвертого ранга упругих модулей, измеренных при постоянном электрическом поле; е_i — тензор пьезомодулей третьего ранга; $\boldsymbol{\varepsilon}$ — тензор деформаций; \mathbf{E} — трехмерный вектор напряженности электрического поля; $\phi(x,t)$ — функция электрического потенци-ала; $\mathbf{\mathfrak{s}}_{j}^{S}$ — тензор второго ранга диэлектри-ческих проницаемостей, измеренных при постоянной деформации; α_{dj} , β_{dj} , ζ_d — неотрицательные коэффициенты демпфирования, а остальные обозначения стандартны для теории электроупругости, за исключением дополнительного индекса «j», указывающего на принадлежность к среде Ω_i с номером j.

Для сред $\Omega_j = \Omega_{em}$ с чисто упругими свойствами будем учитывать только механические поля, для которых примем аналогичные (1.1)–(1.3) полевые уравнения и определяющие соотношения в пренебрежении электрическими полями и эффектами пьезоэлектрической связности.

Система дифференциальных уравнений (1.1)–(1.3) дополняется механическими и электрическими граничными условиями, среди которых отметим условие на электроде Se, подключенном к внешней электрической цепи

$$\int_{S_e} \dot{D}_n ds = I, \qquad (1.4)$$

где *I* — ток в цепи, который в случае свободного электрода равен нулю.

2. Численное моделирование

2.1. Осесимметричная модель

Рассмотрим структуру круглой пластины пьезоэлектрического устройства накопления энергии, составленную из двух пьезоэлементов в форме тонких круглых пластин и тонкой армирующой металлической пластины, вклеенной между двумя дисковыми пьезокерамическими пластинами. Пьезоэлемент состоит из пьезокерамики, поляризованной по толщине. Геометрия устройства представлена на рис. 1. Здесь t_p — толщина пьезоэлектрической пластины, $r_p = l_m + l_p$ — ее радиус; t_s — толщина металлической пластины, $r_s = l_m + l_p + l_0$ — ее радиус; h_m — высота инерционного элемента, $r_m = l_m$ — его радиус. Размер $l_0 = 2$ мм постоянен.

Ниже проводится исследование различных характеристик пьезоэлектрического устройства накопления энергии при воздействии на него гармонически изменяющейся во времени вибрации и рассмотрены пути оптимизации конструкции. В работе достижение наибольшего выходного значения напряжения производится путем изменения соотношения высоты h_m и плотности инерционного материала ρ_m , толщины t_p , t_s , и размеров l_m , l_p .

В случае жестко закрепленного (защемленного) преобразователя осевые и радиальные компоненты смещения всех точек, находящихся на цилиндрической поверхности подложки, равны нулю в подвижной системе координат, закон движения которой имеет вид

$$y = y_0 e^{-i(2\pi f)t}, \tag{2.1}$$

где y_0 — амплитуда колебаний, f — частота колебания в Гц.

В табл. 1 приводятся константы материалов, используемые в расчетах: пьезокерамики РZT-4, алюминия, стали, свинца. Здесь $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \, \Phi/\text{M}; \, \rho = 7,5 \times 10^3 \, \text{кг/M}^3 -$ плотность; Q = 100 -добротность.

Упругие свойства изотропных материалов задаются с помощью модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν .

Рассматривается преобразователь с инерционным элементом из различных материалов: алюминия, стали, свинца, плотность которых отличается более чем в четыре раза (табл. 2).

Для соединительного слоя взяты некоторые усредненные характеристики: плотность

$\begin{array}{c} C_{11}^E, \\ \Gamma \Pi \mathbf{a} \end{array}$	$\begin{array}{c} C_{12}^E, \\ \Gamma\Pi \mathbf{a} \end{array}$	$\begin{array}{c} C_{13}^E, \\ \Gamma\Pi \mathbf{a} \end{array}$	$\begin{array}{c} C_{33}^E, \\ \Gamma \Pi \mathbf{a} \end{array}$	$\begin{array}{c} C_{44}^E, \\ \Gamma\Pi \mathbf{a} \end{array}$	$e_{31}, \\ { m K}_{ m {M}}/{ m {M}}^2$	$e_{33},$ Кл/м 2	$e_{15},\ \mathrm{K}_{\mathrm{J}/\mathrm{M}^2}$	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$
139	77.8	77.4	115	25.6	-5.2	15.1	12.7	730	635

Таблица 1. Материальные константы пьезокерамики PZT-4

Таблица 2. Характеристики конструкционных материалов

	Сталь	Свинец	Алюминий	
Плотность, $ ho imes 10^3~({ m kr/m}^3)$	7,8	11,34	2,7	
Модуль Юнга, $E \times 10^{10}$ (Па)	21	$1,\!6$	6,8	
Коэффициент Пуассона, ν	0,3	$0,\!42$	0,36	

 $\rho = 7500 \text{ кг/м}^3$; модуль Юнга $E = 0, 4 \times 10^{10}$ (Па); коэффициент Пуассона $\nu = 0, 3$.

2.2. Модели расчета

Ниже рассматриваются осесимметричные колебания, поэтому расчетные модели состоят из половины осевого сечения устройства (рис. 16). При этом рассматриваются три модели. В первой модели отсутствует соединительный слой, отмеченный на рис. 16 цифрой 2. Вторая модель учитывает наличие этого слоя. В третьей модели учет инерционной массы производится на лицевой поверхности верхнего пьезоэлектрического слоя с помощью специального краевого условия, которое имеет вид

$$\sigma_z = M\omega^2 (u_z + y_0)/S,$$

$$\tau_{zx} = 0 \text{ при } z = h_m,$$
(2.2)

где M — инерционная масса, ω — круговая частота колебаний, S — площадь верхнего участка пьезоэлемента, к которому должна быть прикреплена инерционная масса.

При этом приняты следующие ограничения на геометрические размеры конструкции (рис. 1): $t_p = 0,5$ мм; $r_p = 8$ мм; $t_s = 0,5$ мм; $r_s = 10$ мм; $h_m = 2$ мм. Радиус инерционного элемента изменяется в интервале $r_m = 0 \div 8$ мм. Материалы, используемые в расчетах: материал пьезоэлемента — пьезокерамика РZT-4; материал пластины подложки — сталь; материал инерционного элемента — свинец. Колебания возбуждаются на собственных частотах или на некоторых фиксированных частотах, например, f = 10 Гц, f = 100 Гц.

Исследуется зависимость электрического потенциала на свободном электроде в зависимости от геометрических размеров и разных материалов инерционного элемента для трех моделей. На рис. 2 представлены зависимости электрического потенциала на верхнем свободном электроде в низкочастотной области f = 10 Гц и амплитудного колебания $y_0 = 10$ мм в зависимости от радиуса инерционного слоя r_m для трех моделей.

Из рис. 2 видно, что результаты расчетов для модели с жестко соединенной массой (первая модель) в случаях, когда использовались пакеты ACELAN (кривая 1) и ANSYS (кривая 4), показывают достаточно хорошее совпадение для всего диапазона изменения радиуса инерционной массы.

В случаях, когда расчеты проводились в ACELAN для трех модели (кривая 1, 2 и 3) видно, что, если значение радиуса инерционного слоя $r_m \leq 1,5$ мм, то значение электрического потенциала для трех модели близки. Если значение радиуса инерционного слоя 1,5 мм $\leqslant r_m \leqslant 3,5$ мм, то значение электрического потенциала для модели с разделительным слоем (кривая 2) и модели с пьезокерамическим слоем и граничными условиями 6 (кривая 3) близки, но больше, чем значение электрического потенциала для модели с жестко соединенной массой (кривая 1). Если значение радиуса инерционного слоя $r_m \ge 3,5$ мм, то значение электрического потенциала для модели с разделительным слоем (кривая 2) выше значения электрического потенциала для модели с жестко соединенной массой (кривая 1), но ниже значения электрического потенциала для модели с пьезокерамическим слоем и граничными условиями 6 (кривая 3). Значение электрического потенциала для второй модели и третьей модели становятся больше и продолжают монотонно возрастать, тогда как для первой модели при $r_m = 5$ мм достигается максимум (жесткость инерционной массы влияет на прогиб биморфа). Как можно видеть, при увеличении значения радиуса инерцион-



Рис. 2. Зависимость электрического потенциала от радиуса инерционной массы r_m : 1 — первая модель (ACELAN); 2 — вторая модель (ACELAN); 3 — третья модель (ACELAN); 4 — первая модель (ANSYS)

ного слоя r_m увеличивается разность значения электрического потенциала для моделей 2 и 3, что связано с влиянием жесткости соединительного слоя.

Таким образом, модель пьезоэлектрических устройств накопления энергии, в которой между инерционной массой и пьезокерамическим слоем присутствует разделительный слой, не препятствующий в значительной степени изгибу биморфа (вторая модель), является наиболее эффективной.

2.3. Оптимизация конструкции

Далее рассматривается выбор рациональных значений размерных параметров l_m , l_p , t_p , t_s , h_m (выходное напряжение V достигает максимума) и материала инерционного элемента (значение плотности ρ_m) для второй модели, имеющей инерционную массу, разделенную соединительным слоем с пьезокерамическим слоем (рис. 16).

Резонансная частота пьезоэлектрического устройства накопления энергии является одним из самых важных факторов, влияющих на эффективность устройства преобразовывать механическую энергию в электрическую.

Во первых, рассматривается влияние на собственную резонансную частоту f_r толщин t_s, t_p , размеров l_m, l_p , высоты инерционного элемента h_m и материала инерционного эле-

мента (плотности ρ_m). Полученные зависимости представлены на рис. 3, 4.

На рис. За представлены зависимости собственной частоты от значения l_m , расположенного в интервале 1÷25 мм, и значения l_p , расположенного в интервале 1÷30 мм. Радиус r_p пьезоэлектрической пластины равен $r_p = l_m + l_p$. Радиус r_s металлической пластины вычисляется по формуле $r_s = l_m + l_p + l_0$. Значения толщин $t_s = 0, 12$ мм, $t_p = 0, 12$ мм, значение высоты инерционного элемента $h_m = 7$ мм (материал инерционного элемента — свинец). В том случае, когда частота вынужденных колебаний является фиксированной (например 100 Гц), построенная поверхность позволяет определить множество значений геометрических параметров l_m и l_p , при которых эта частота является резонансной.

На рис. Зб представлены аналогичные зависимости собственной частоты от значения параметров t_s , и t_p , при этом t_s изменяется в интервале 0,05÷0,25 мм, а t_p — в интервале 0,05÷0,25 мм. Значения размеров $l_m = 19$ мм, $l_p = 20$ мм, значение высоты инерционного элемента $h_m = 7$ мм (материал инерционного элемента — свинец).

На рис. 4 представлены зависимости собственной частоты от высоты инерционного элемента h_m , изменяющейся в интервале 1÷10 мм, и материала инерционного элемента (алюминий, сталь, свинец). Значения



Рис. 3. Зависимость собственной частоты от размерных параметров l_m, l_p, t_s, t_p



Рис. 4. Зависимости собственной частоты от высоты инерционного элемента h_m и типа материала инерционной массы (плотности ρ_m): 1 — алюминий; 2 — сталь; 3 — свинец

 $l_m = 19\,$ Mm, $l_p = 20\,$ Mm, $t_p = 0,12\,$ Mm, $t_s = 0,12\,$ Mm.

По данным, представленным на рис. 3, 4 могут быть выбраны параметры устройства, эффективно работающего в частотном диапазоне 30 ÷10000 Гц при значениях l_m , l_p , t_p , t_s , h_m , ρ_m , расположенных в интервале $l_m = 1\div25$ мм, $l_p = 1\div30$ мм, $t_s = 0,05\div0,25$ мм, $t_p = 0,05\div0,25$ мм, $h_m = 1\div10$ мм. Таким образом, из полученных результатов можно выбрать оптимальный размер пьезоэлектрического устройства накопления энергии с нужной резонансной частотой. В частности, если частота вынужденных колебаний составляет 100 Гц, то рациональные геометрические размеры конструкции расположены в интервале $r_p = l_m + l_p = 38 \div 40$ мм, $t_s + t_p = 0, 23 \div 0, 25$ мм, $h_m = 6 \div 7$ мм (материал инерционного элемента — свинец), то пьезоэлектрическое устройство накопления энергии работает эффективно для частоты вынужденных колебаний 100 Гц.

Во вторых, найдем зависимость выходного напряжения V от толщин t_s , t_p , размеров l_m , l_p , высоты инерционного элемента h_m и плотности инерционного элемента ρ_m . Значения размеров $r_p = l_m + l_p = 38$ мм и $t_s + t_p = 0,24$ мм постоянны. Значения размеров l_m , t_s , h_m , ρ_m расположены в интервале $l_m = 5 \div 37$ мм, $t_s = 0,05 \div 0,18$ мм, $h_m = 1 \div 10$ мм. В качестве частоты возбуждения выбрано значение f = 100 Гц, а амплитуды колеба-



Рис. 5. Зависимости значения электрического потенциала от значени
й $l_m, t_s. 1-$ алюминий; 2-сталь; 3-свинец

ния — $y_0 = 0, 1$ мм. Полученные результаты представлены на рис. 5.

На рис. 5а представлены зависимости значения электрического потенциала на верхнем свободном электроде от значения l_m , расположенного в интервале 5÷38 мм и значения t_s , расположенного в интервале $0,05\div0,18$ мм, значение высоты инерционного элемента $h_m = 7$ мм (материал инерционного элемента — свинец).

Из рис. 5а видно, что при значениях $l_m = 16$ мм, $l_p = r_p - l_m = 22$ мм, $t_s = 0, 1$ мм, $t_p = 0, 4 - t_s = 0, 14$ мм значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде V достигает максимума.

На рис. 5б представлены зависимости электрического потенциала на верхнем свободном электроде от значения высоты инерционного элемента h_m , расположенного в интервале 1÷10 мм и материала инерционного элемента (алюминий, сталь, свинец). Значения размеров $l_m = 16$ мм, $l_p = 22$ мм, $t_p = 0, 14$ мм, $t_s = 0, 1$ мм.

Из рис. 56 видно, что при значении $h_m = 7$ мм (материал инерционного элемента — свинец) значение электрического потенциала на верхнем свободном электроде V достигает максимума.

Анализ результатов показывает, что оптимальными параметрами при выбранном ограничении на габариты обладает пьезо-электрическое устройство накопления энергии со значениями $l_m = 16$ мм; $l_p = 22$ мм; $t_s = 0,1$ мм; $t_p = 0,14$ мм; $h_m = 7$ мм (материал инерционного элемента — свинец), $\rho_m = 11,34 \times 10^3 ({\rm kr/m}^3).$

Заключение

В работе исследована эффективность устройства накопления энергии в зависимости от его геометрических характеристик и материалов в условиях некоторых ограничений на размеры устройства. Построены континуальные и дискретные их модели пакетах ACELAN и ANSYS.

Проведенное в работе конечноэлементное моделирование устройства накопления энергии с использование пьезоэлектрической керамики и расчет на его основе, показывает границы применимости упрощенной модели учета инерционной массы, а также позволяет выбрать рациональные размеры элементов. Кроме того, сравнение различных моделей дает возможность конструктору улучшить технологию сборки устройства, применяя не стесняющие деформацию биморфа промежуточные слои с малой жесткостью.

Литература

- 1. Priya S., Inman D. J. Energy harvesting technologies // Springer Science+Business Media, LLC. 2009. 522 p.
- Erturk A., Inman D. J. Piezoelectric energy harvesting // John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 402 p.
- Minazara E., Vasic D., Costa F. Piezoelectric Generator Harvesting Bike Vibrations Energy to Supply Portable Devices // In Proceedings of ICREPQ. 12–14 march 2008 Santander, Spain. 6 p.
- 4. Anton S. R., Sodano H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–

2006) // Smart Mater. Struct. 2007. Vol. 16. No. 3. P. 1–21.

- Priya S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers // Journal of Electroceramics. 2007. Vol. 19. P. 165–182.
- Sodano H., Inman D., Park G. Generation and storage of electricity from power harvesting devices // J. Intell. Mater. Syst. Struct. 2005. Vol. 16. P. 67–75.
- Jyh-Cheng Yu, Chin-Bing Lan. System modeling of microaccelerometer using piezoelectric thin films // Sensors and Actuators A. 2001. Vol. 88. P. 178–186.
- Adhikari S., Friswell M. I., Inman D. J. Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations // Smart Mater. Struct, 2009, Vol. 18. P. 115005–115012.
- 9. Litak G., Friswell M.I., Adhikari S. Magnetopiezoelastic energy harvesting driven by random excitations // Appl. Phys. Lett.

2010. Vol. 96. No. 5. P. 214103:1-3.

- Sodano H. A., Park G., Inman D. J. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting // Strain. 2004. Vol. 40. No. 2. P. 49–58.
- Parton V. Z., Kudryavtsev B. A. Electromagnetoelasticity of Piezoelectrics and Electrically Conductive Solids. M.: Nauka, 1988. P. 1–472.
- 12. Huan Xue, Hongping Hu. Nonlinear Characteristics of a Circular Plate Piezoelectric Harvester with Relatively Large Deflection Near Resonance // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. Vol. 55. No. 9. September 2008. P. 2092–2096.
- Белоконь А. В., Наседкин А. В., Соловьев А. Н. Новые схемы конечно-элементного динамического анализа пьезоэлектрических устройств // Прикладная математика и механика. 2002. Т. 66. No. 3. C. 491–501.

Ключевые слова: конечно-элементное моделирование, накопление энергии, пьезоэлектрик, оптимизация, биморф.

Статья поступила 11 июля 2013 г.

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону

© Соловьев А. Н., Ле В. Зыонг, 2013