

УДК 537.9

**ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДВУХФАЗНОЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ****М.И.Бичурин, В.М.Петров, И.Н.Соловьев, А.Н.Соловьев****BENDING VIBRATIONS OF DUAL-PHASE MAGNETOELECTRIC STRUCTURE****M.I.Bichurin, V.M.Petrov, I.N.Solov'ev, A.N.Solov'ev***Институт электронных и информационных систем НовГУ, Mirza.Bichurin@novsu.ru*

Рассмотрен магнитоэлектрический эффект в двухфазной магнитоэлектрической структуре с консольным закреплением на основе двухслойной магнитоэлектрической структуры и магнитной пластины. Показано, что в области электромеханического резонанса воздействию магнитного поля 16 Э и ускорения закрепленного конца величиной 0,8 g приводят к индуцированному напряжению 1-2 В.

**Ключевые слова:** *магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрическая структура, изгибная мода колебаний, электромеханический резонанс, устройство для сбора энергии*

The magnetoelectric behavior of a dual-phase magnetostrictive-piezoelectric cantilever is discussed in this article. The cantilever is formed by magnetoelectric bilayer clamped by a shaker and magnetic plate. It is shown that applied magnetic field of 16 Oe and shaker acceleration of 0.8 g induced the approximately equal output voltage of 1-2 V.

**Keywords:** *magnetoelectric effect, magnetostrictive-piezoelectric structure, bending mode, electromechanical resonance, energy-accumulation device*

Известно, что магнитоэлектрический (МЭ) эффект в композиционных материалах возникает в результате механического взаимодействия магнитной и электрической подсистем и заключается в индуцировании электрической поляризации в материале во внешнем магнитном поле или в появлении намагниченности во внешнем электрическом поле [1]. Одним из основных параметров, характеризующих МЭ эффект, является МЭ коэффициент по напряжению,  $\alpha_E$ , равный отношению индуцированного переменного электрического поля к приложенному магнитному переменному полю в условиях разомкнутой электрической цепи. Величина коэффициента определяется геометрическими размерами образца, магнитными, диэлектрическими и механическими параметрами составляющих ее компонентов и частоты внешнего магнитного поля. По сравнению с однофазными материалами МЭ взаимодействие в композиционном материале приводит к большим значениям МЭ коэффициентов. Это позволяет использовать магнитоэлектрические композиционные ма-

териалы в multifunctional устройствах, таких как МЭ преобразователи, устройства для сбора энергии и датчики. В области электромеханического резонанса (ЭМР) наблюдается значительное усиление МЭ эффекта [2-6], поскольку МЭ эффект в композиционных материалах обусловлен механической связью компонент. С точки зрения практического использования существенным недостатком продольных мод ЭМР являются большие значения резонансных частот, которые достигают сотен килогерц при длине образца порядка 10 мм. При этом для номинальных размеров образца изгибные колебания происходят на значительно более низких частотах по сравнению с радиальными и толщинными колебаниями, что делает изгибные моды предпочтительными с точки зрения практических применений [7,8]. При этом образец в форме стержня с консольным закреплением характеризуется наиболее низким значением резонансной частоты изгибных колебаний [9].

В данной работе рассматривается ЭМР в двухфазной магнитоэлектрической структуре

туре. Получены выражения для индуцированного напряжения при воздействии на образец внешнего магнитного поля. Численные оценки выполнены для структуры на основе волокнистого цирконата-титаната свинца (ЦТС) и метгласа. Рассматривается возможность использования рассматриваемой структуры в устройстве для сбора магнитной и механической энергии.

**1. Объект исследования и методика измерений**

Рассматриваемая двухфазная магнитоэлектрически-пьезоэлектрическая консольная структура образована соединением двухслойной МЭ структуры состава волокнистый ЦТС — метглас и пластины метгласа (рис.1).

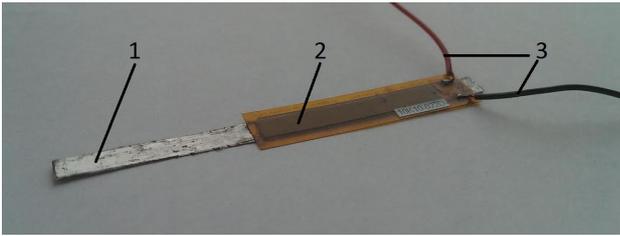


Рис.1. Двухфазная магнитоэлектрически-пьезоэлектрическая структура: 1 — пластина метгласа, 2 — двухслойная МЭ структура состава — метглас, 3 — выводы

Основой двухслойной МЭ структуры является волокнистый ЦТС марки М4005-Р1 [10] размерами 40×5×0,3 мм с планарными электродами, что позволяет использовать наибольший пьезоэлектрический модуль  $d_{33}$ . С помощью клеевого соединения волокнистый ЦТС жестко скреплен с прямоугольной пластиной из магнитоэлектрического материала метглас. Дополнительная пластина из метгласа имела длину 40 мм и толщину 0,08 мм.

В данной статье исследуется продольный в плоскости образца МЭ эффект, при котором подмагничивающее и переменное магнитное поля направлены вдоль длины образца, а пьезоэлектрический материал поляризован по длине. При данном расположении магнитных и электрических полей наблюдается максимальный МЭ коэффициент по напряжению [1]. Схема измерительного стенда представлена на рис.2.

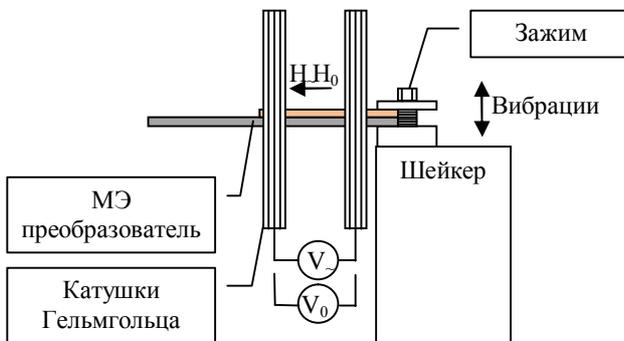


Рис.2. Измерительный стенд

Для возбуждения изгибных колебаний используется магнитное поле, создаваемое катушками Гельмгольца. Для оценки возможности применения

данной структуры в устройстве для сбора энергии использовалось возбуждение изгибных колебаний с помощью шейкера вертикальных вибраций.

Исследуемый образец закрепляется в зажиме, жестко соединенном с шейкером вертикальных вибраций. Питание шейкера и катушек Гельмгольца осуществляется с помощью функционального генератора НМF2550 (HAMEG Instruments GmbH, Германия). Разница фаз между механическими и магнитными колебаниями установлена равной нулю. Постоянное магнитное поле создается с помощью дополнительной пары обмоток катушек Гельмгольца, питаемых от программируемого источника питания НМР4040 (HAMEG Instruments GmbH, Германия). Индуцируемое напряжение регистрируется с помощью измерительной системы, состоящей из тесламетра АТТ-8701 (Актаком, Россия), осциллографа НМО722 (HAMEG Instruments GmbH, Германия), мультиметра НМ8112-3 (HAMEG Instruments GmbH, Германия), LCR-метра НМ8118 (HAMEG Instruments GmbH, Германия).

**2. Теоретическое моделирование магнитоэлектрического эффекта**

В основу теоретической модели положено уравнение изгибных колебаний структуры, толщина которой значительно меньше остальных геометрических размеров, а ее ширина мала по сравнению с длиной, ориентированной вдоль оси  $x$  [9]

$$\nabla^2 \nabla^2 w + \frac{\rho t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} = 0, \tag{1}$$

$$\nabla^2 \nabla^2 w_1 + \frac{m \rho^m t}{m D} \frac{\partial^2 w_1}{\partial \tau^2} = 0,$$

где  $\nabla^2 \nabla^2$  — бигармонический оператор,  $w$  и  $w_1$  — прогиб (смещение в направлении  $z$  перпендикулярно плоскости образца) для двухслойной структуры и пластины метгласа,  $t$  и  $\rho$  — толщина и средняя плотность образца, а  $\tau$  — время. Для двухслойной структуры толщина  $t = {}^p t + {}^m t$ ,  $\rho = ({}^p \rho {}^p t + {}^m \rho {}^m t)/t$ , где  ${}^p \rho$ ,  ${}^m \rho$ ,  ${}^p t = \nu \cdot t$  и  ${}^m t = (1 - \nu) \cdot t$  — плотности и толщины пьезоэлектрического и магнитного слоя соответственно, а  $\nu$  — объемная доля пьезоэлектрика.

Деформации слоев двухслойной структуры связаны с прогибом соотношением  ${}^p m S_1 = -z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$ .

Для деформации пластины метгласа справедливо аналогичное соотношение. Закон упругости для пьезоэлектрического и пьезомагнитного слоев может быть записан в следующем виде:

$${}^p T_1 = {}^p Y^D ({}^p S_1 - {}^p g_{33} {}^p D_1), \tag{2}$$

$${}^m T_1 = {}^m Y^B ({}^m S_1 - {}^m h_{11} {}^m B_1), \tag{3}$$

где  ${}^p T_1$ ,  ${}^m T_1$ ,  ${}^p S_1$ ,  ${}^m S_1$  — компоненты тензоров напряжений и деформаций пьезоэлектрической и магнитоэлектрической фаз, соответственно,  ${}^p D_1$  — индукция электрического поля,  ${}^m B_1$  — магнитная индукция,  ${}^p g_{33}$  — пьезоэлектрический коэффициент при постоянной механической деформации,  ${}^p Y^D$  — модуль упругости пьезоэлектрической компоненты при постоянной индукции,  ${}^m Y^B$  и  ${}^m g_{11}$  — модуль упругости пьезомагнит-

ной компоненты при постоянной магнитной индукции и пьезомагнитный коэффициент  $\partial^m S_1 / \partial^m B_1$  при постоянном механическом напряжении соответственно.

Материальные уравнения для обеих фаз записываются в следующем виде:

$${}^p E_3 = -{}^p g_{33} {}^p T_1 + \frac{1}{{}^p \epsilon_{33}} {}^p D_1, \quad (4)$$

$${}^m H_1 = -{}^m g_{11} {}^m T_1 + \frac{1}{{}^m \mu_{11}} {}^m B_1, \quad (5)$$

где  ${}^m H_1$  — напряженность магнитного поля,  ${}^m \mu_{11}$  — магнитная проницаемость пьезомагнитного материала,  ${}^p \epsilon_{33}$  — диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрической фазы.

Для нахождения постоянных интегрирования, входящих в общие решения уравнений (1), следует использовать условия сшивания решений для  $w$  и  $w_1$  при  $x = L$ , а также граничные условия для консольного закрепления, которые имеют вид:

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = a, \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{при } x = 0,$$

$$M_x = 0 \quad \text{и} \quad V_x = 0 \quad \text{при } x = L + L_1, \quad (6)$$

где  $L$  — длина двухслойной структуры,  $L_1$  — длина пластины метгласа, вращающий момент относительно оси  $y$  описывается соотношением  $M_x = \int_A z T_1 dA$ .

В этом выражении  $A$  — поперечное сечение структуры перпендикулярно оси  $x$ . Поперечная сила определяется как  $V_x = \frac{\partial M_x}{\partial x}$ . Индуцированное напряжение определяется как интеграл от напряженности электрического поля по межэлектродному расстоянию. При этом для нахождения напряженности электрического поля используется условие разомкнутой цепи:  ${}^p D_1 = 0$ .

### 3. Результаты моделирования и экспериментального исследования

Результаты моделирования частотной зависимости МЭ эффекта приведены на рис.3.

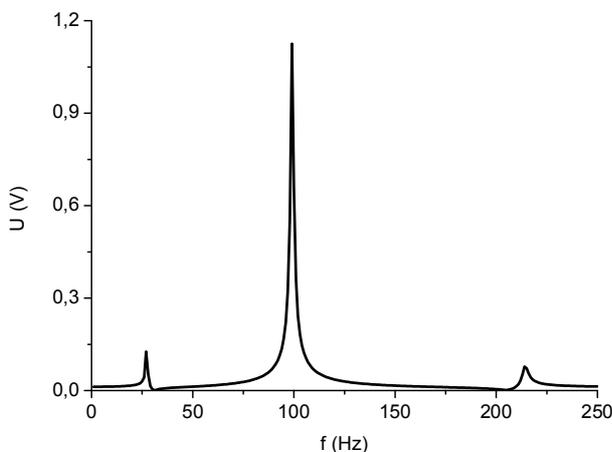


Рис.3. Частотная зависимость выходного напряжения при напряженности внешнего магнитного поля 16 Э

Зависимость на рис.3 показывает, что наибольший МЭ эффект наблюдается на второй резонансной частоте структуры.

Для оценки возможности использования исследуемой структуры в качестве устройства для сбора энергии на рис.4 приведены частотные зависимости выходного напряжения при прикладывании к образцу внешнего магнитного поля и сообщения образцу ускорения при  $x = 0$  с помощью шейкера.

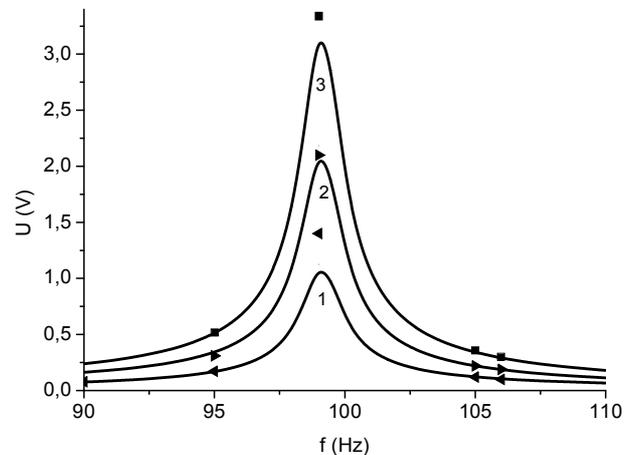


Рис.4. Частотная зависимость выходного напряжения в области второй резонансной частоты: 1 — при напряженности внешнего магнитного поля 16 Э; 2 — при ускорении, создаваемом шейкером, 0,8 g; 3 — при совместном воздействии внешнего магнитного поля 16 Э и ускорении зажатого конца образца 0,8 Э. Сплошные линии — теоретические оценки, точки — эксперимент

Полученные оценки показывают, что суммарное выходное напряжение равно сумме напряжений, индуцируемых внешним магнитным полем и механическими вибрациями.

### Заключение

В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование МЭ эффекта в двухфазной структуре, образованной двухслойной магнитоэлектрично-пьезоэлектрической структурой и соединенной с ней магнитной пластиной. Показано, что воздействие магнитного поля 16 Э и ускорения закрепленного конца образца величиной 0,8 g приводят к индуцированному напряжению 1-2 В. Полученные результаты позволяют рекомендовать исследуемую структуру для использования в устройствах сбора магнитной и механической энергии.

1. Ce-Wen Nan, M.I.Bichurin, S.Dong, D.Viehland, and G.Srinivasan. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions // J. Appl. Phys., 2008, vol. 103, p. 031101.
2. Z.Xing, S. Dong, Junyi Zhai, Li Yan, J.Li, and D.Viehland. Resonant bending mode of Terfenol-D/steel/Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> magnetoelectric laminate composites // Appl. Phys. Lett., 2006, vol. 89, p. 112911.
3. J. Zhai, Z. Xing, S Dong, J. Li, and D. Viehland. Thermal noise cancellation in symmetric magnetoelectric bimorph laminates // Appl. Phys. Lett., 2008, vol. 93, pp. 072906 (1-3).
4. D.V. Chashin, Y.K. Fetisov, and K.E. Kamentsev, and G. Srinivasan. Resonance magnetoelectric interactions due to bending modes in a nickel-lead zirconate titanate bilayer // Appl. Phys. Lett., 2008, vol. 92, pp. 102511 (1-3).
5. M.I.Bichurin, D.A.Fillipov, V.M.Petrov, U.Laletsin, N.Paddubnaya, and G.Srinivasan. Resonance magnetoelectric

- effects in layered magnetostrictive-piezoelectric composites // Phys. Rev. B 2003, vol. 68, pp. 132408 (1-6).
6. V.M.Petrov, M.I.Bichurin, V.V.Zibtsev, S.K.Mandal, and G.Srinivasan. Flexural deformation and bending mode of magnetoelectric nanobilayer // J. Appl. Phys., 2009, vol. 106, pp. 113901 (1-5).
  7. J.Zhai, Z.Xing, S.Dong, J.Li and D.Viehland. Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature // Appl. Phys. Lett., 2006, vol. 88, pp. 062510 (1-3).
  8. V.M.Petrov, G.Srinivasan, M.I.Bichurin, and T.A.Galkina. Theory of magnetoelectric effect for bending modes in magnetostrictive-piezoelectric bilayers // J. Appl. Phys., 2009, vol. 105, pp. 063911 (1-4).
  9. S.P.Timoshenko and D.H.Young. Vibration problems in engineering. 3rd ed. N.Y.: Van Nostrand Co., Inc., 1955.
  10. Y.Yan, Y.Zhou, and S.Priya. Enhanced magnetoelectric effect in longitudinal-longitudinal mode laminate with cofired interdigitated electrodes // Appl. Phys. Lett., 2014, vol. 104, p. 032911.