

УДК 537.226.4

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МЕХАНОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В. А. Головнин¹, Е. С. Горнев¹, А. В. Дайнеко¹, Д. А. Добрынин¹,
Д. В. Друина², Н. О. Мамкина²

¹ Научно-исследовательский институт «ЭЛПА», Зеленоград

² Тверской государственный университет
кафедра прикладной физики

Рассмотрен баланс энергии пьезокерамических механоэлектрических преобразователей (МЭП) в режиме генерации электрической энергии. Проведена сравнительная оценка возможностей пьезоэффекта в пьезокерамике системы цирконата-титаната свинца (ЦТС) для генерации электричества при деформациях сжатия-растяжения и изгиба. Рассмотрены примеры применения пьезокерамических МЭП для преобразования рассеянной механической энергии движущегося транспорта в электрическую.

Ключевые слова: пьезокерамические механоэлектрические преобразователи, пьезоэффект, ЦТС

1. Введение. Поиск и изучение альтернативных источников энергии являются одним из популярных направлений научных исследований и практических разработок. К устройствам сбора микроэнергии, способным добывать энергию из окружающей среды, которые являются альтернативой микроваттных батарей, относятся механоэлектрические преобразователи (далее МЭП) на основе прямого пьезоэффекта в пьезоэлектриках [1-8]. Ежегодный мировой рост производства пьезокерамических микрогенераторов составляет ~ 40% [1] благодаря инновационному использованию пьезокерамических МЭП для производства электричества из энергии механических колебаний средств передвижения, в устройствах мониторинга трубопроводов, зданий и сооружений и др.

В настоящей работе рассмотрен баланс энергии МЭП в режиме генерации электрической энергии; проведена сравнительная оценка возможностей МЭП на пьезокерамике системы ЦТС для генерации электричества при деформациях сжатия-растяжения и изгиба; рассмотрены примеры применения пьезокерамических МЭП для реализации автономных источников питания.

2. Баланс энергии механоэлектрических преобразователей. Для МЭП энергия $W_{об}$ представляется в виде произведения обобщенной силы $F_{об}(t)$ на обобщенную координату $h_{об}(t)$:

$$W_{OB} = F_{OB}(t) \cdot h_{OB}(t), \quad (1)$$

а поток энергии \dot{W}_{OB} , как производную от энергии по времени, можно представить как произведение обобщенной силы на обобщенную скорость $V_{OB}(t)$

$$\dot{W}_{OB} = F_{OB}(t) \cdot V_{OB}(t). \quad (2)$$

Воздействия силы (периодические, единичные кратковременные и случайные) во времени можно представить в виде гармонических функций с помощью интеграла Фурье:

$$F_{OB}(t) = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\infty}^{\infty} F_n(\omega) e^{-j\omega t} d\omega,$$

где $F_n(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \cdot e^{j\omega t} d(t)$ – спектральная плотность воздействия;

$F(\omega) \cdot d(\omega)$ представляет собой комплексную амплитуду воздействия в бесконечно малой полосе частот $d(\omega)$.

Гармонические функции, которыми представлены воздействия, сохраняют свой вид при прохождении через линейные системы, поэтому МЭП, как линейные системы, можно рассматривать при действии на них обобщенных сил, изменяющихся по гармоническому закону. При этом обобщенные координаты, характеризующие работу преобразователя, также будут гармоническими. Опуская множитель $e^{j\omega t}$, уравнения (1) и (2) энергии W_{OB} и потока энергии \dot{W}_{OB} можно записать как комплексные величины

$$W_{OB} = F_{OB} h_{OB}^* \quad (1')$$

$$\dot{W}_{OB} = F_{OB} V_{OB}^* \quad (2')$$

(знак * означает, что величина комплексно сопряженная).

Обобщённое комплексное сопротивление Z_{OB} определится как $Z_{OB} = F_{OB} / V_{OB} = R_{OB} + jX_{OB}$, где R_{OB} и X_{OB} – активная и реактивная составляющие комплексного сопротивления.

При работе МЭП в режиме генератора в уравнении баланса энергии, представленном в виде

$$\bar{W}_{MX.C} = \bar{W}_{MX} - \bar{W}_{MX.П} - \bar{W}_{ЭМ},$$

поток полной энергии $\bar{W}_{MX.C}$ состоит из втекающего потока \bar{W}_{MX} механической энергии и вытекающих потоков $-\bar{W}_{MX.П}$ механической потенциальной и $-\bar{W}_{ЭМ}$ – электрической энергии.

Поток $\bar{W}_{MX} = F_M V^*(h_0)$, где F_M – приведенная сила, характеризующая действие со стороны источника механической энергии. Поток энергии, преобразованный в электрическую форму $\bar{W}_{ЭМ}$, частично идет на изменение электрической стороны МЭП $\bar{W}_{ЭМ.П}$ и частично $\bar{W}_{ЭМ.Н}$ идет в нагрузку $Z_{ЭМ.Н}$,

$$\bar{W}_{ЭМ} = \bar{W}_{ЭМ.П} + \bar{W}_{ЭМ.Н} = |U|^2 (1/Z_{ЭМ.П} + 1/Z_{ЭМ.Н}) \quad (3)$$

Таким образом, в электрическую цепь потребителя дойдет только часть $\bar{W}_{ЭМ.Н}$ потока $\bar{W}_{ЭМ}$ энергии $W_{ЭМ}$, преобразованной в электрическую форму.

Коэффициент полезного действия МЭП можно определить как отношение активного потока энергии, втекающего в нагрузку, к активному потоку энергии, втекающему в преобразователь:

$$\eta_{ЭМП} = \frac{\text{Re} \bar{W}_{ЭМ.Н}}{\text{Re} \bar{W}_{MX}} = \frac{\text{Re} \bar{W}_{ЭМ}}{\text{Re} \bar{W}_{MX}} \cdot \frac{\text{Re} \bar{W}_{ЭМ.Н}}{\text{Re} \bar{W}_{ЭМ}} = \eta_{ЭМ} \cdot \eta_{ЭМ.Н}, \quad (4)$$

где $\eta_{ЭМП}$ – полный коэффициент полезного действия (КПД) преобразователя, $\eta_{ЭМ.Н}$ – КПД при передаче электрической энергии в нагрузку, $\eta_{ЭМ}$ – электромеханический КПД, представляющий собой отношение активной составляющей потока энергии, преобразованного в электрическую форму $\bar{W}_{ЭМ}$, к активной составляющей потока механической энергии, подводимой к преобразователю \bar{W}_{MX} , $\eta_{ЭМ} = k_{ЭФ}^2$, где $k_{ЭФ}$ – эффективный коэффициент электромеханической связи (КЭМС), который характеризует пьезоэлементы МЭП конечных размеров с определенным распределением деформаций.

3. Возможности пьезоэффекта для генерации электричества, деформация сжатия-растяжения. Для пьезокерамических МЭП, использующих пьезоэффект при деформации сжатия-растяжения (рис. 1), “втекающая” механическая энергия $W_{MX} = W$, как произведение обобщенной силы $F_{об}(t)$ на обобщенную координату $h_{об}(t)$, принимает вид

$$dW = F \cdot d \cdot (\Delta h), \quad (5)$$

где $F = T_{33}D$ (T_{33} – компонента тензора механического напряжения, D – площадь пьезокерамики, перпендикулярная F), $\Delta h = S_{33} \cdot h$ определяется деформацией S_{33} высоты h пьезокерамики.

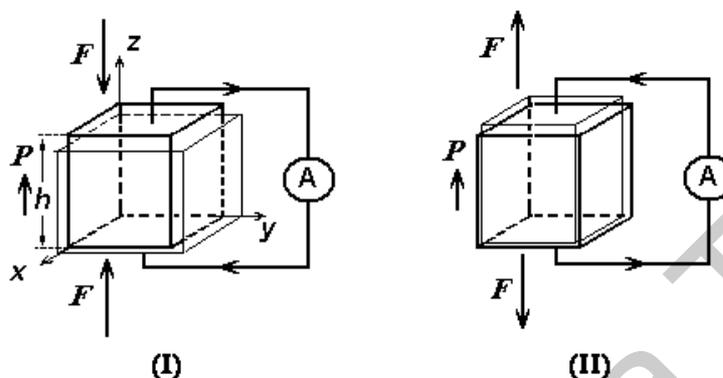


Рис. 1. Прямой пьезоэлектрический эффект: (I) сжатие; (II) растяжение. Жирными линиями показаны первоначальные размеры пьезокерамики. При сжатии (I) в направлении вектора поляризации \mathbf{P} образуется положительный заряд, а при растяжении (II) – отрицательный

Учитывая, что $S_{33} = s_{33} \cdot T_{33}$ (механическая деформация S_{33} по оси 3 (Z) равна произведению упругой податливости s_{33} на механическое напряжение T_{33}), выражение (5) можно представить в виде:

$$dW = T_{33}D \cdot d(s_{33} \cdot T_{33} \cdot V/D) = VT_{33} \cdot s_{33} \cdot d \cdot T_{33}, \quad (5')$$

откуда
$$W_{MX} = \frac{1}{2} \cdot V \cdot S_{33} (T_{33})^2. \quad (6)$$

Для единицы объема пьезокерамики “втекающая” механическая энергия

$$W_{MXOB} = \frac{1}{2} \cdot S_{33} \cdot (T_{33})^2. \quad (6')$$

Электрическая энергия $W_{ЭМ}$, преобразованная из механической W_{MX} после воздействия механического напряжения T_{33} и запасенная пьезоэлектриком, как конденсатором емкости C с разностью потенциалов U и объемом пьезокерамики V , равна

$$W_{ЭМ} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{d_{33}^2 T_{33}^2 D^2 h}{\epsilon \epsilon_0 D} = \frac{1}{2 \epsilon \epsilon_0} V (d_{33} T_{33})^2, \quad (7)$$

где $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 D}{h}$, $U = Q/C$, $Q = d_{33}F = d_{33}T_{33}D$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ [Ф/м] – диэлектрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость, d_{33} – пьезомодуль.

Для единицы объема пьезокерамики в МЭП сжатия-растяжения электрическая энергия $W_{ЭМОБ}$, преобразованная из механической

$$W_{ЭМОБ} = \frac{1}{V} W_{ЭМ} = \frac{d_{33}^2 T_{33}^2}{2\varepsilon_0 \varepsilon_{33}} \quad (7)$$

и определяется только механическим воздействием T_{33} и параметрами пьезокерамического материала d_{33} и ε_{33} . Поток $\bar{W}_{ЭМОБ}$ этой энергии частично идет на изменение электрической стороны МЭП $\bar{W}_{ЭЛ.П}$ (с нагрузкой $Z_{ЭЛ.П}$) и частично $\bar{W}_{ЭЛ.Н}$ идет в «полезную» нагрузку $Z_{ЭЛ.Н}$.

$$\bar{W}_{ЭМОБ} = \bar{W}_{ЭЛ.П} + \bar{W}_{ЭЛ.Н} = |U|^2 (1/Z_{ЭЛ.П} + 1/Z_{ЭЛ.Н}). \quad (8)$$

Значения энергии, запасенной при одном воздействии на МЭП сжатия-растяжения с объемом пьезокерамики 1 см^3 , оценивается, при типичных, реализуемых в производстве значениях $d_{33} = 500 \text{ пКл/Н}$, $\varepsilon = 2000$ и $T_{33} = 6 \cdot 10^7 \text{ Па}$ (при котором ещё керамика не деградирует и сохраняется линейность преобразования), как $W_{ЭМОБ} = W_{РАБ} = 0,024 \text{ Дж}$. Максимальное значение $W_{МАХ}$ энергии при разрушающем воздействии $T_{33} = 30 \cdot 10^7 \text{ Па}$ может быть оценено, в первом приближении, как $W_{МАХ} = 0,61 \text{ Дж}$.

Отметим, что эта величина не зависит от конструкции пьезоэлементов МЭП, является ли они монолитными ($10 \times 10 \times 10 \text{ мм}$), или многослойными пьезоэлементами с 200-ми слоями по 50 мкм. Расстояние h между электродами определяет, при фиксированном значении механического напряжения, величину U_C возникающей разности потенциалов:

$$U_C = \frac{d_{33} T_{33} h}{\varepsilon_{33} \varepsilon_0}, \quad (9)$$

диапазон напряжений для реализуемых толщин от 10 мм до 50 мкм достаточно широк – от 17 кВ до 85 В соответственно.

Для МЭП сжатия-растяжения механоэлектрический КПД пьезоэлементов

$$\eta_{\text{ЭМ}}^{\text{C}} = k_{\text{ЭФС}}^2 = \frac{W_{\text{ЭМ}}}{W_{\text{МХ}}} = \frac{\frac{1}{2\epsilon\epsilon_0} V (d_{33} T_{33})^2}{\frac{1}{2} \cdot V \cdot s_{33} (T_{33})^2} = \frac{d_{33}^2}{\epsilon\epsilon_0 s_{33}} = k_{33}^2, \quad W_{\text{ЭМ}} = k_{33}^2 W_{\text{МХ}}, \quad (10)$$

где $k_{\text{ЭФС}}$ – эффективный КЭМС для деформации сжатия-растяжения, k_{33} – КЭМС для сжатия-растяжения (рис. 1), когда направления поляризации и действия сил параллельны и деформации распределены по объему равномерно. $\eta_{\text{ЭМ}}^{\text{C}} = k_{33}^2 \approx 0,5$ для МЭП сжатия-растяжения на пьезокерамике ЦТС.

По выражению (7') можно определить эффективность пьезокерамических материалов для генерации электроэнергии. Оптимальное значение электрической энергии $W_{\text{ЭМОБ}} = 25 \cdot 10^{-3}$ Дж, запасенной пьезокерамическим МЭП объемом 1 см^3 при одном нажатии будет использовано для дальнейших оценок.

4. Оценка значения электрической энергии, запасаемой пьезокерамическими МЭП на одном метре автоколеи. Примем, что автомобили с расстоянием между осями 2 метра, массой 2400 кг, движутся со скоростью 20 м/с (72 км/час) с интервалом 8 м. Площадь контакта колеса с грунтом составляет $0,2 \times 0,1$ м, где 0,2 м – ширина протектора. Масса равномерно (по 600 кг) распределена между четырьмя колёсами автомобиля.

Для пьезоэлементов с размерами $1 \times 1 \times 1$ см, давления $6 \cdot 10^7$ Па для МЭП, расположенных на расстояниях 0,1 м друг от друга электрическая энергия, запасаемая МЭП при одном нажатии, равна $25 \cdot 10^{-3}$ Дж, при снятии давления запасается еще $25 \cdot 10^{-3}$ Дж, соответственно для участка дороги длиной 1 м можно получить мощность 4 Вт потока энергии $\bar{W}_{\text{ЭМ}}$, преобразованной в электрическую форму. Значение генерируемой электрической энергии $W_{\text{ЭЛН}}$ определяется $\eta_{\text{ЭЛН}}$ – КПД при передаче электрической энергии в нагрузку.

5. Оценка значения электрической энергии, запасаемой пьезокерамическими МЭП при механической вибрации вагона. Рассмотрим случай железнодорожного вагона массой $40 \cdot 10^3$ кг, с четырьмя колесными пары с нагрузкой на пару $\sim 100 \cdot 10^3$ Н и частотой собственных колебаний 25 Гц.

При расположении МЭП на каждой колесной паре для получения оптимального давления $T_{33} = 6 \cdot 10^7$ Па площадь МЭП должна составлять $D \approx 20 \text{ см}^2$. При толщине пьезокерамики 1 см МЭП площадью 20 см^2 при одном цикле сжатия-растяжения может запасть

$W_{ЭМ} = 20 \cdot 2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}$ Дж = 1 Дж, при 25 циклах в секунду запасается электрическая энергия для мощности 25 Вт потока энергии $\bar{W}_{ЭМ}$. При увеличении толщины МЭП в 10 раз (объём ≈ 200 см³) запасённая энергия для четырёх МЭП запасённая энергия может достигать значений, достаточных для развития мощности 1 кВт.

6. Возможности пьезоэффекта для генерации электричества, деформация изгиба. Рассмотрим изгибные колебания биморфных МЭП, состоящих из двух поляризованных по толщине пьезокерамических пластин, соединённых между собой. Направления поляризации **P** и возникающих электрических полей **E**, размеры, схемы крепления и электрических соединений приведены на рис. 2.

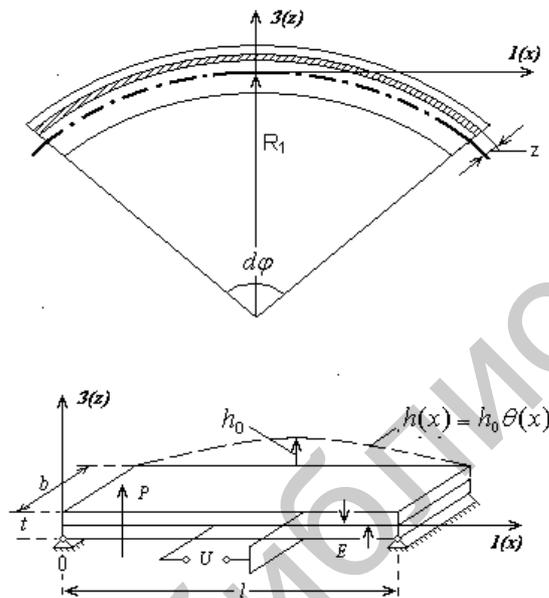


Рис. 2. Биморфный пьезокерамический механо-электрический преобразователь с опёртыми концами

В силу малости ширины b и толщины t пластин по сравнению с длиной l можно принять механические напряжения $T_{22} \cong 0$ и $T_{33} \cong 0$, и воспользоваться уравнениями пьезоэффекта в виде:

$$D_3 = d_{31} T_{11} + \epsilon_{33}^T E_3, \quad S_{11} = d_{31} E_3 + s_{11}^E T_{11}. \quad (11)$$

Если смещение $h(x)$ поверхности биморфа записать как функцию координаты x $h(x) = h_0 \theta(x)$, то деформацию растяжения S_{11} в направлении оси $l(x)$ тонкого слоя пластины на расстоянии z от средней поверхности, которая при изгибе остается нерастянутой, можно определить из соотношения:

$$S_{11} = \frac{(R_1 + z)d\varphi - R_1 d\varphi}{R_1 d\varphi} = \frac{z}{R_1} = -zh_0 \frac{\partial^2 \theta(x)}{\partial x^2}, \quad (12)$$

где радиус кривизны R_1 пластины при ее изгибе (рис. 2) определен как

$$R_1 = 1/(\partial^2 h / \partial x^2).$$

В отсутствии электрического поля, при $E_3 = 0$ из уравнений (11) следует, по закону Гука,

$$T_{11} = S_{11} / s_{11}^E = (z \cdot h_0 / s_{11}^E) \cdot \partial^2 \theta(x) / \partial x^2. \quad (13)$$

Упругое напряжение в любом слое биморфной пластины определяется координатами z – расстояние от средней линии и x – положение на оси $l(x)$, оно изменяется от нулевого значения для средней поверхности, где $z = 0$, до максимального значения на поверхности пластины, где $z = t/2$.

Максимальное значение $T_{11} = T_p$ соответствует прочности пьезокерамики ЦТС на растяжение ($T_p \approx (20 \div 30)$ МПа) и определяет зависимость допустимого радиуса кривизны R_p от толщины z пластины биморфа. Из (12) и (13) имеем

$$R_p = \frac{z}{S_{11}} = \frac{z}{T_{11p} \cdot s_{11}^E}. \quad (14)$$

Для каждого слоя биморфного МЭП механическая энергия может быть записана как произведение обобщенной силы на обобщенную координату, в нашем случае, при $E_3 = 0$, механическая энергия для всего объема \tilde{V}

$$W_{MX}^E = \frac{1}{2} \int_{\tilde{V}} T_{11} S_{11} d\tilde{V} = \frac{h_0^2 b}{2s_{11}^E} \int_0^l \int_{-t/2}^{t/2} z^2 \left(\frac{\partial^2 \theta(x)}{\partial x^2} \right)^2 dz dx = \frac{h_0^2 J}{2s_{11}^E} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 \theta(x)}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (15)$$

где $J = bt^3/12$ – момент инерции поперечного сечения пластины.

При изгибных деформациях свободного биморфа с опертыми концами, к середине которого приложена сила F , $\theta(x) = (16/5l) \cdot (x - 2x^3/l^2 + x^4/l^3)$ и запасаемая механическая энергия

W_{MXC}^E

$$W_{MXC}^E = \frac{h_0^2 J}{2s_{11}^E} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 \left[(16/5l) \cdot (x - 2x^3/l^2 + x^4/l^3) \right]}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (16)$$

Для изгибных деформаций консоли, к незакрепленному концу которой приложена сила F (рис. 3), $\theta(x) = (x^2/2l^2) \cdot (3 - x/l)$ и запасаемая механическая энергия $W_{МХК}^E$ определится из (15) как

$$W_{МХК}^E = \frac{h_0^2 J}{2s_{11}^E} \int_0^l \left(\frac{\partial^2 [(x^2/2l^2) \cdot (3 - x/l)]}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (17)$$

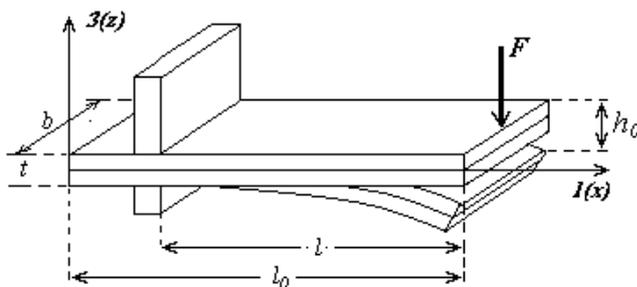


Рис. 3 Биморфный пьезокерамический электромеханический преобразователь с одним закрепленным концом

Значение величины U_H возникающей разности потенциалов зависит от способа электрического соединения пластин биморфа, максимальное значение U_H определится как

$$U_H = \frac{d_{31} T_{11} t}{\epsilon_{33} \epsilon_0} \quad (18)$$

При максимальном значении $T_{11P} \approx 30$ МПа, $d_{31} = 250 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н, $\epsilon_{33} = 2000$, $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, диапазон максимальных напряжений для реализуемых толщин t от 1 мм до 50 мкм достаточно широк, от 420 до 21 В.

Для пьезоэлементов МЭП при изгибных деформациях механоэлектрический КПД $\eta_{ЭМ}^H = k_{ЭФП}^2$, где $k_{ЭФП}$ определяется видом механической системы.

Для свободного биморфа на двух опорах (рис. 2) $k_{ЭФПС} = 0,78k_{31}$, для консольно закрепленного биморфа (рис. 3) $k_{ЭФПК} = 2k_{31}/3$, для свободной круглой пластины с опорой по периметру $k_{ЭФПП} = 3k_p/4$, для биморфов и пластин, жестко закрепленных по концам или периметру, $k_{ЭФП} = 0$ (k_{31} – КЭМС для случая, когда направление действия сил перпендикулярно поляризации и деформации распределены по объему равномерно, k_p – КЭМС для случая радиального направления действия

сил перпендикулярно поляризации (в круглых пластинах, планарный коэффициент электромеханической связи).

7. Оценка значения электрической энергии, запасаемой биморфными пьезокерамическими ЭМП. Биморфные пьезоэлементы с характеристиками, приведенными в таблице, разработаны в ОАО НИИ Элпа для работы в режиме обратного пьезоэффекта.

Таблица
Характеристики биморфных пьезоэлементов ОАО НИИ Элпа

№ п/п	Габариты $l \times b \times t$, мм	V , В	R , мм	F , Н	f , Гц
1	100×22×1,0	80	1,4	0,30	56
2	40×12×0,6	80	1,1	0,35	150
3	55×2×0,8	200	1,0	0,02	106
4	35×2,5×0,6	150	0,8	0,05	196

(V – рабочее напряжение питания, В, \pm ; R – полное перемещение (размах) рабочего конца биморфного пьезоэлемента, мм; F – усилие, развиваемое биморфным пьезоэлементом при подаче управляющего напряжения, при заблокированном (нулевом смещении) на рабочем конце (блокирующее усилие), Н; f – резонансная частота, Гц).

Пусть при работе этих пьезоэлементов в режиме генерации действие силы F , равной блокирующему усилию, на незакрепленный конец биморфа приведет к перемещению R . Выражение втекающей механической энергии $W_{MX} = W$, как произведение обобщенной силы $F_{об}(t)$ на обобщенную координату $h_{об}(t)$, принимает вид

$$dW = F \cdot d \cdot (\Delta R). \quad (19)$$

Механическая энергия W_{MXK1} одного цикла колебаний определится как

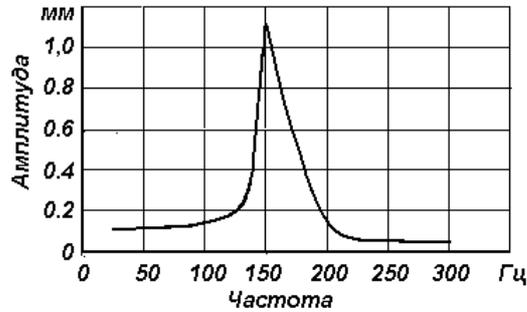
$$W_{MXK1} = 2 \frac{1}{2} FR = FR. \quad (20)$$

В предположении, что биморфы совершают вынужденные колебания на частоте f , механическая энергия W_{MXK1C} за секунду определится как

$$W_{MXK1C} = W_{MXK1} \cdot f = FRf. \quad (21)$$

На рис. 4 приведена типичная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) консольно закрепленного биморфа. На распространенной частоте промышленных вибраций $f = 100$ Гц его характеристики соответствуют приведенным в таблице значениям. Для

МЭП на основе такого биморфа механическая энергия одного цикла колебаний из выражений (20) и (21) $W_{МХК1} = 0,385 \cdot 10^{-6}$ Дж, втекающая в МЭП за секунду механическая энергия $W_{МХК1С} = 0,385 \cdot 10^{-4}$ Дж (поток механической энергии, подводимой к преобразователю $\dot{W}_{МХК1С} = 0,385 \cdot 10^{-4}$ Дж/с).



Р и с . 4. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) консольно закрепленного биморфа с размерами $40 \times 12 \times 0,6$ мм; управляющее напряжение питания 10 В

Поток энергии, преобразованный в электрическую форму

$$\begin{aligned} \bar{W}_{ЭМК} &= \dot{W}_{МХК1С} \cdot \eta_{ЭМ}'' = \dot{W}_{МХК1С} \cdot k_{ЭФИ}^2 = \dot{W}_{МХК1С} (2k_{31}/3)^2 \\ &= 0,385 \cdot 10^{-4} \cdot 0,045 = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ [Вт]} \end{aligned}$$

Поток электрической энергии в нагрузку $\bar{W}_{ЭЛН}$ будет определяться значением $\eta_{ЭЛН}$ – КПД при передаче электрической энергии в нагрузку. При $\eta_{ЭЛН} = 0,5$ реализуемая мощность достаточна, например, для питания датчиков давления в шинах автомобилей. Максимальное значение напряжения согласно (18) равно 126 В.

Отметим, что при работе на резонансной частоте значение R размаха колебаний и, соответственно, мощность ЭМП может возрасти на порядок, ограничиваясь значением прочности пьезокерамики на разрыв.

8. Сравнительная оценка возможностей МЭП на пьезокерамике ЦТС при деформациях сжатия-растяжения и изгиба. Анализ формул (6) и (15) позволяет провести сравнительную оценку втекающих потоков механической энергии при деформациях растяжения-сжатия и изгиба. Для МЭП растяжения-сжатия механическое напряжение $T_{33} \approx 60$ МПа одинаково по всему объему. Для МЭП изгиба механическое напряжение изменяется от нуля на средней поверхности биморфа ($z = 0$) до максимального $T_{11P} \approx (20 \div 30)$ МПа при $z = t/2$. В первом случае напряжение ограничено

условиями деградации (~ 60 МПа), во втором – прочностью керамики на растяжение (~20...30 МПа). Учитывая распределение напряжений и квадратичную зависимость W_{MX} от механического напряжения T , можно полагать, что максимальные значения запасаемой механической энергии в единице объема пьезокерамических МЭП при деформациях растяжения-сжатия на порядок больше, чем при изгибных деформациях.

Оценка значений электромеханического КПД $\eta_{ЭМ}^H$ для изгибных деформаций пьезоэлементов из керамики ЦТС при $k_{31} = 0,32$ приводит к значениям

$$\eta_{ЭМ}^H = k_{ЭФН}^2 \approx (0,44 \div 0,61) \cdot k_{31}^2 \approx (0,044 \div 0,061), \quad (22)$$

на порядок меньшим, чем $\eta_{ЭМ}^C = k_{33}^2 \approx 0,5$ при деформации сжатия-растяжения. Однако МЭП при изгибных деформациях более эффективны для генерации электрической энергии при малых значениях действующих сил и/или механических напряжений.

9. Заключение. Пьезокерамические механоэлектрические преобразователи решают две из трех задач при генерации электричества – поглощения механической энергии из окружающей среды и преобразования механической энергии в электрическую энергию; третья задача – обработка и хранение преобразованной электрической энергии в работе не рассматривалась.

Механические воздействия – периодические, единичные кратковременные и случайные – могут быть преобразованы в электрическую энергию при соответствующем выборе размеров, моды колебаний и пьезокерамического материала МЭП. Производимая энергия пропорциональна частоте и упругому напряжению сжатия-растяжения, увеличение генерируемой энергии может быть получено при работе на резонансе. Требования к пьезокерамическим материалам для МЭП, работающим в дорезонансном и резонансном режимах, несколько отличаются. В обоих случаях требуются пьезокерамические материалы с высокими значениями коэффициента электромеханической связи и диэлектрической проницаемости, так как механоэлектрический КПД пропорционален коэффициенту электромеханической связи, а большая емкость понижает импеданс на выходе ЭМП и способствует отбору мощности. Для резонансного режима требуются также высокая динамическая добротность и прочность на растяжение.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы”.

Список литературы

1. Priya S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers // Journ. Electroceramics. 2007. V. 19, N. 1. P. 167–184.
2. Blystad L.-C. J., Halvorsen E. An energy harvester driven by colored noise // Smart Mater. Struct. 2011. V. 20. P. 025011.
3. Cho J.H., Richards R.F., Bahr D.F., Richards C.D., Anderson M.J. Efficiency of energy conversion by piezoelectrics // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 104107.
4. Ujihara M., Carman G.P., Lee D.G. Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 093508.
5. Sebald G., Pruvost S., Guyomar D. Energy harvesting based on Ericsson pyroelectric cycles in a relaxor ferroelectric ceramic // Smart Mater. Struct. 2008. V. 17. P. 015012.
6. Penella M.T., Gasulla M. A review of commercial energy harvesters for autonomous sensors // Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Warsaw, 2007. P. 9718147.
7. Sun C., Qin L., Li F., Q.-M. Wang. Piezoelectric Energy Harvesting using single crystal $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_{3-x}/\text{PbTiO}_3$ (PMN-PT) Device // Journ. Intelligent Mater. Syst. Struct. 2009. V. 20. N. 5 559-568.
8. Ng T.H., Liao W.H. Sensitivity Analysis and Energy Harvesting for a Self-Powered Piezoelectric Sensor. Journ. Intelligent Mater. Syst. Struct. 2005. V. 16, N. 10. 785-797.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF PIEZOCERAMIC MECHANOELECTRIC TRANSDUCERS FOR GENERATION OF ELECTRICITY

V. A. Golovnin¹, E. S. Gornev¹, A. V. Daineko¹, D. A. Dobrynin¹,
D. V. Druina², N. O. Mamkina²

¹Research institute "ELPA", Zelenograd

²Tver State University

Chair of Applied Physics

The energy balance of piezoceramic mechanoelectric transducers in the electric energy generation mode has been considered. A comparison is made of the piezoeffect possibilities in lead zirconate-titanate (LZT) piezoceramics for the generation of electricity during compression-extension and bending deformation. Examples of the applications of dissipated mechanical energy of moving transport conversion into electric energy with the aid of mechanoelectric transducers for the realization of autonomous power sources are given.

Keywords: *piezoceramic mechanoelectric transducers, piezoelectric effect, LZT*

Об авторах:

ГОЛОВНИН Владимир Алексеевич – кандидат физ.-мат. наук, начальник лаборатории ОАО НИИ "ЭЛПА", 124460 Москва, Зеленоград, Северная промышленная зона, Панфиловский проспект, д.10, *e-mail*: golovnin41@rambler.ru;

ГОРНЕВ Евгений Сергеевич – доктор технических наук, заместитель генерального директора по НТР ОАО НИИ "ЭЛПА";

ДАЙНЕКО Андрей Владимирович – директор Центра управления проектами ОАО НИИ "ЭЛПА";

ДОБРЫНИН Данила Андреевич – техник лаборатории пьезокерамических пленок ОАО НИИ "ЭЛПА";

ДРУИНА Дарья Викторовна – магистрант кафедры прикладной физики ТвГУ, 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33;

МАМКИНА Наталья Олеговна – аспирант кафедры прикладной физики ТвГУ.