

05

Наибольшая магнитоэлектрическая восприимчивость в композитных магнитострикционных пьезотрансформаторах, управляемая магнитным полем

© Г.С. Радченко, М.Г. Радченко

Педагогический институт Южного федерального университета,
Ростов-на-Дону
Научно-исследовательский институт физики Южного федерального
университета, Ростов-на-Дону
Ростовский филиал Московского государственного технического
университета гражданской авиации, Ростов-на-Дону
E-mail: grig1980@mail.ru

Поступило в Редакцию 23 марта 2012 г.

Сделан теоретический анализ работы композитного магнитоэлектрического пьезотрансформатора под действием магнитного поля на основе эквивалентных схем. Прогнозируется наибольшая прямая магнитоэлектрическая (МЭ) восприимчивость прибора. Строится частотная зависимость МЭ-восприимчивости, которая близка к эксперименту. Теоретически подтверждено существование резонансов, частоты которых обусловлены совместными массоупругими взаимодействиями в секциях составного прибора.

В настоящее время одной из важных задач современной физики является эффективное преобразование магнитного поля в электрическое поле и наоборот с помощью упругих взаимодействий [1–9]. Этот эффект может найти применение в устройствах неразрушающего контроля, электромагнитных приборах без наличия магнитного сердечника, пьезомагнитоэлектрических датчиках, детекторах магнитного поля и т.д. Новая возможность получения значительной магнитоэлектрической (МЭ) восприимчивости пьезотрансформационным методом описана в работах [4,5,7]. Также подробно исследуется инверсный МЭ-эффект [8,9] в пьезотрансформаторах. Обычный пьезотрансформатор подробно описан в литературе [2]. Для гибридной слоистой структуры

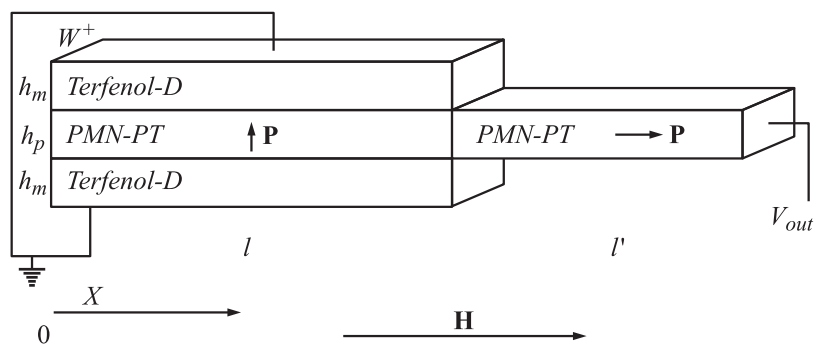


Рис. 1. Наглядная схема МЭ-пьезотрансформатора из [5] с обозначениями, используемая здесь для расчетов.

магнетик–пьезоэлектрик анализ на основе метода эквивалентных схем был проведен в [3]. Однако анализ был ограничен анализом усиления по напряжению, и в работе не была описана МЭ-восприимчивость. Также устройство [3] значительно отличалось от описываемого аналога в данной работе и в [4,5,7]. Отличие устройства, описываемого в работе [5], от МЭ-пьезотрансформатора [8,9] заключается в том, что в [8, 9] у прибора отсутствует усиливающая выходная секция.

Рассмотрим устройство, изображенное на рис. 1. Оно представляет собой пьезотрансформатор с входной секцией из МЭ-композита (PMN-PT и Terfenol-D) и выходной секцией из монокристалла PMN-PT. Магнитное поле, создаваемое катушкой вокруг первичной секции, преобразуется в механические напряжения в магнитострикционной компоненте и пьезоэлектрике первичной секции. Далее, акустические возмущения передаются вторичной секции через торцевое сечение. В ней в результате прямого пьезоэффекта генерируется усиленное электрическое напряжение. Выходы входной секции ($L-T$ -режим) предполагаются соединенными и МЭ-напряжение на первичной секции [5] не возникает. Началом координат для расчетов является левый край прибора. Направления поляризации \mathbf{P} пьезокристаллов входной и выходной секций показаны на рис. 1 стрелками. Первичная композитная секция описывается системой (1)

$$S^* = s^*T^* + q^*H^*; B^* = q^*T^* + \mu^*H^*. \quad (1)$$

Здесь H^* — напряженность приложенного магнитного поля, S^* — компонента тензора деформаций, B^* — магнитная индукция, s^* — эффективная упругая податливость, q^* — продольный пьезомагнитный коэффициент, μ^* — магнитная проницаемость входной секции. Решение уравнения акустических колебаний для величины деформаций композитной секции является стандартным и дается в [2, с. 142–143]. Введем понятия краевых сил и площади входной секции Terfenol-PMN-PT в следующей форме:

$$\begin{aligned}\hat{F}_1 &= -T_1(x=0)A = -\left(\frac{1}{s^*}S^* - \frac{q^*}{s^*}H^*\right)_{x=0} A \\ &= -\frac{\beta^*A}{s^*}(B_1 \cos(\beta^*x) - B_2 \sin(\beta^*x)_{x=0}) + \frac{q^*A}{s^*}H^*; \\ F_2 &= -T_1(x=l)A = -\frac{\beta^*A}{s^*}(B_1 \cos(\beta^*l) - B_2 \sin(\beta^*l)) + \frac{q^*A}{s^*}H^*, \\ A &= W^*h^* = W^*(2h_m + h_p).\end{aligned}$$

Здесь β^* — величина эффективного волнового вектора входной секции, A — площадь торцевого сечения входной секции, l — длина входной секции (рис. 1). Силы, действующие на края входной секции, имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned}\hat{F}_1 &= -\frac{\beta^*A}{s^*}B_1 + \frac{q^*A}{s^*}H^*; \\ \hat{F}_2 &= -\frac{\beta^*A}{s^*}(B_1 \cos(\beta^*l) - B_2 \sin(\beta^*l)) + \frac{q^*A}{s^*}H^*.\end{aligned}\quad (2)$$

Скорости движения краев сонаправлены с выбранным направлением краевых сил и определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}v_1 &= \frac{\partial u}{\partial t}(x=0); \quad \hat{v}_1 = j\omega B_2; \quad v_2 = -\frac{\partial u}{\partial t}(x=l); \\ \hat{v}_2 &= -j\omega(B_1 \sin(\beta^*l) + B_2 \cos(\beta^*l)).\end{aligned}$$

Из этих уравнений получаем

$$B_2 = \frac{1}{j\omega}\hat{v}_1; \quad B_1 = -\frac{1}{j\omega}\left(\frac{\hat{v}_1}{\operatorname{tg}(\beta^*l)} + \frac{\hat{v}_2}{\sin(\beta^*l)}\right).\quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (2) и делая стандартные упрощения, получаем выражения (4) для эквивалентной схемы (рис. 2, *b*) первичной секции:

$$\begin{aligned}\hat{F}_1 &= jZ_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\beta^* l}{2} \right) \hat{v}_1 + \frac{Z_0}{j \sin(\beta^* l)} (\hat{v}_1 + \hat{v}_2) + \frac{q^* A}{s^*} H^* \\ &= Z_1^* \hat{v}_1 + Z_2^* (\hat{v}_1 + \hat{v}_2) + \frac{q^* A}{s^*} H^*, \\ \hat{F}_2 &= jZ_0 \operatorname{tg} \left(\frac{\beta^* l}{2} \right) \hat{v}_2 + \frac{Z_0}{j \sin(\beta^* l)} (\hat{v}_1 + \hat{v}_2) + \frac{q^* A}{s^*} H^* \\ &= Z_1^* \hat{v}_2 + Z_2^* (\hat{v}_1 + \hat{v}_2) + \frac{q^* A}{s^*} H^*.\end{aligned}\quad (4)$$

Здесь $Z_0 = \sqrt{\rho^* Y^* h^* W^*}$, где ρ^* , Y^* , h^* , W^* — плотность, модуль Юнга, высота и ширина входной секции (рис. 1) из работы [5] соответственно. Теоретическое описание пьезоэлектрической выходной секции аналогично описанному выше и подробно дано в [2] (End-Plated Bar, p. 149–153).

Составим итоговую схему устройства [5] (рис. 1) на основе граничных условий ($x = l$ для входной секции и $x = 0$ для выходной секции). Соответствующие параметры усиливающей пьезосекции записаны со штрихом:

- 1) $-v_2 = v_1'$ — равенство модулей скоростей упругого смещения на границе секций [10], знак „-“ поставлен в соответствии с [2];
- 2) $F_2 = F_1'$ — условие равенства модулей продольных механических сил на границе секций [10];
- 3) $F_1 = F_2' = 0$ — условие механически свободных краев МЭ-пьезо-трансформатора.

Полученная схема первичной секции и итоговая эквивалентная схема рассматриваемого устройства приведены на рис. 2. Они составлены с учетом того, что токи в цепи эквивалентны скоростям упругих деформаций, а напряжения эквивалентны описанным торцевым силам. Механические импедансы выходной секции имеют такую же форму записи [2]. Их величины определяются свойствами кристалла PMN-PT [5]. Электрические свойства выходной секции (L и C) даются на с. 153 в [2] при подстановке параметров PMN-PT. Гармоническое механическое напряжение на входе схемы, созданное магнитным полем катушки вокруг входной секции, равно $V_{\text{magn}} = q^* Y^* W^* h^* H^*$, где

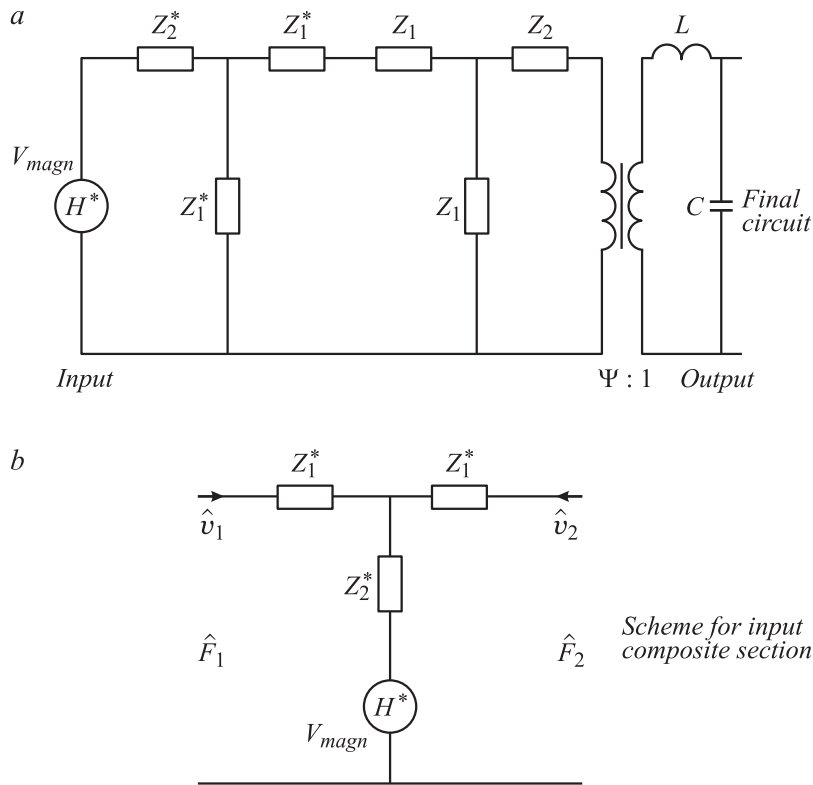


Рис. 2. Эквивалентная механомагнитоэлектрическая схема МЭ-пьезотрансформатора, обладающего усиливающей пьезосекцией (а), и его композитной секции (b).

H^* — напряженность переменного магнитного поля. Коэффициент трансформации выходной секции описывается формулой $\Psi = W^*d/s$, где d и s — пьезомодуль и упругая податливость РМТ-РТ. Далее проведено нахождение МЭ-коэффициента по напряжению при слабом переменном магнитном поле 1 Ое. На рис. 3 (основной фрагмент) показана расчетная частотная зависимость МЭ-восприимчивости при параметрах схемы из [5] и экспериментальные результаты работы [5] на вставке рис. 3. Видно хорошее согласие с экспериментом при малых подмагничивающих полях в $L - L$ -режиме (напряжение между входной

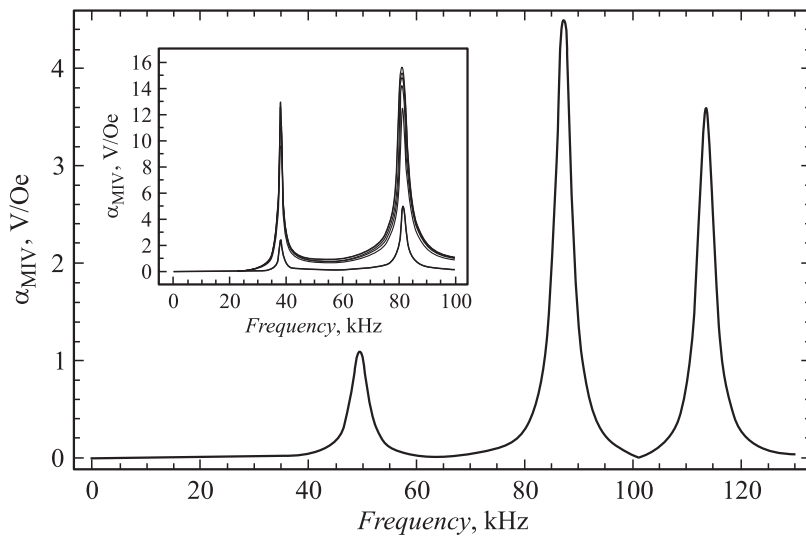


Рис. 3. Теоретическая с параметрами из [5] и экспериментальная (на вставке) частотные зависимости МЭ-восприимчивости α_{MIV} пьезотрансформатора при $H^* = 1$ Ое. Для теоретической зависимости подмагничивающее поле равно 10 Ое. На вставке кривые α_{MIV} приведены для значений напряженности подмагничивающего поля 10, 200, 600, 800, 1000 Ое. С ростом напряженности кривые сдвигаются вверх.

секцией и правым краем выходной секции [5]). Однако резонансные частоты в эксперименте несколько ниже, чем в теории. Это объясняется тем, что при описании входной секции теория не учитывает существование соединительного компонента E-Solder [5] с большими упругими податливостями. Также здесь предполагается идеальная механическая связь между слоями входной секции, что не совсем справедливо для эксперимента [5].

Как показывает анализ итоговой формулы для выходного напряжения, третий максимум в теоретической зависимости $V_{\text{out}}(f)$ обусловлен первым резонансом в выходной секции, так как

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2l' \sqrt{\rho s}} \approx 113.6 \text{ kHz}.$$

Здесь ρ — плотность кристалла PMN-PT, l' — длина выходной секции (от места соединения секций до правого края прибора). Численные значения берутся из работы [5].

Параметры описанного прибора могут управляться подмагничивающим полем из-за магнитострикционных свойств первичной секции. Это видно из fig. 3 (Wang et al. [5]) и вставки на рис. 3. Процессы установления пьезомагнетизма в первичной секции происходят быстрее, чем процессы поляризации или изменения пьезомодуля под действием электрического поля, применяемые для управления свойствами стандартных пьезотрансформаторов [2]. Это открывает новые возможности для варьирования МЭ-свойств прибора, достижения наибольшего управляемого МЭ-коэффициента и усиления напряжения в широких пределах. Наличие пьезоэлектрика в секциях дает возможность управления свойствами прибора и электрическим полем.

Авторы благодарны проф. В.П. Сахненко за постоянный интерес к работе.

Список литературы

- [1] Nan C.-W., Bichurin M.I., Dong S. et al. // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 031 101 (1–35).
- [2] Lin Chih-yi. Design and analysis of Piezoelectric Transformer Converters / Dissertation for Ph. D. in Electrical Engineering. July 15, 1997. Blackburg, Virginia, 1997. 171 p.
- [3] Dong Sh., Li J.-F., Viehland D. // J. Materials Science. 2006. V. 41. P. 97–106.
- [4] Lv L., Zhou J.-P., Guo Y.-Y. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. P. 055 002 (1–5).
- [5] Wang Y., Chung M.L., Wang F. et al. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. V. 42. P. 135 414 (1–5).
- [6] Радченко Г.С. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 22. С. 14–20.
- [7] Wang Y., Wang F., Or S.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 93. P. 113 503 (1–3).
- [8] Филиппов Д.А., Галкина Т.А., Srinivasan G. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 21. С. 23–28.
- [9] Филиппов Д.А., Галкина Т.А., Лалетин В.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 2. С. 82–86.
- [10] Манжосов В.К. Модели продольного удара. Ульяновск: УлГТУ, 2006. 160 с.