

УДК 537.9

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА  
НА ОСНОВЕ НОМОГРАММ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА**

**В.С.Леонтьев**

**THE NOMOGRAPH METHOD FOR PREDICTING MAGNETOELECTRIC EFFECT  
IN THE ELECTROMECHANICAL RESONANCE REGION**

**V.S.Leont'ev**

*Институт электронных и информационных систем НовГУ, viktorsergeevich.novsu@gmail.com*

Магнитоэлектрические (МЭ) композиты, в отличие от известных однофазных структур, характеризуются наличием гигантского МЭ эффекта. Исследования МЭ композитов открыли широкие возможности для создания различных приложений. В данной статье предлагается апробация метода экспресс-анализа МЭ эффекта на основе номограмм. Было получено экспериментальное подтверждение достоверности метода экспресс-анализа МЭ эффекта в области электромеханического резонанса.

**Ключевые слова:** *магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрическая структура, метод номограмм, электромеханический резонанс*

Magnetolectric (ME) composites are known to enable the achievement of ME voltage coefficients which are many orders of magnitude larger than previously reported values for single phase materials. The advancements have opened up many possibilities in designing various applications. This paper presents the approbation of a new quick test of ME composites using nomographs. We obtained an experimental confirmation of reliability of the quick test of ME effect in the electromechanical resonance region.

**Keywords:** *magnetolectric effect, magnetolectric structure, nomograph method, electromechanical resonance*

### Введение

В последние годы интенсивно изучается МЭ эффект в магнитострикционно-пьезоэлектрических структурах для создания датчиков магнитного поля, преобразователей и сборщиков энергии [1-4]. В материалах такого рода МЭ эффект проявляется как результат взаимодействия магнитострикционной и пьезоэлектрической фаз компонентов, т.е. электрическая поляризация индуцируется внешним переменным магнитным полем в присутствии подмагничивающего поля. Значение МЭ эффекта характеризуется МЭ коэффициентом по напряжению  $\alpha_E = E/H$ . Практически для расчета МЭ коэффициентов приходится решать множество сложных аналитических уравнений.

С другой стороны, значения МЭ коэффициентов могут быть получены на основе численно-графических методов [5,6]. Предложенный метод направлен на оптимизацию структуры магнитоэлектрических композитов для низкочастотных датчиков тока [7]. Для более эффективной оценки значений

МЭ коэффициентов предлагается использовать разработанный метод номограмм. Ранее опубликованные работы не имели экспериментального подтверждения адекватности данного метода [8].

Следует отметить, что точность номограмм ограничена точностью физических параметров структуры. Кроме того, номограммы также могут быть использованы для проверки значений, полученных другими методами.

Цель настоящей статьи состоит в проверке достоверности экспресс-анализа методом номограмм МЭ эффекта в области ЭМР.

### Магнитоэлектрический эффект в области ЭМР

Для решения уравнения движения среды использовались граничные условия для трехслойной структуры, когда оба конца свободны. Резонансная частота ЭМР рассчитывалась по формуле:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{p_{S_{11}} + r^m s_{11}}{p_{S_{11}} m_{S_{11}} (r^p \rho + m \rho)}}, \quad (1)$$

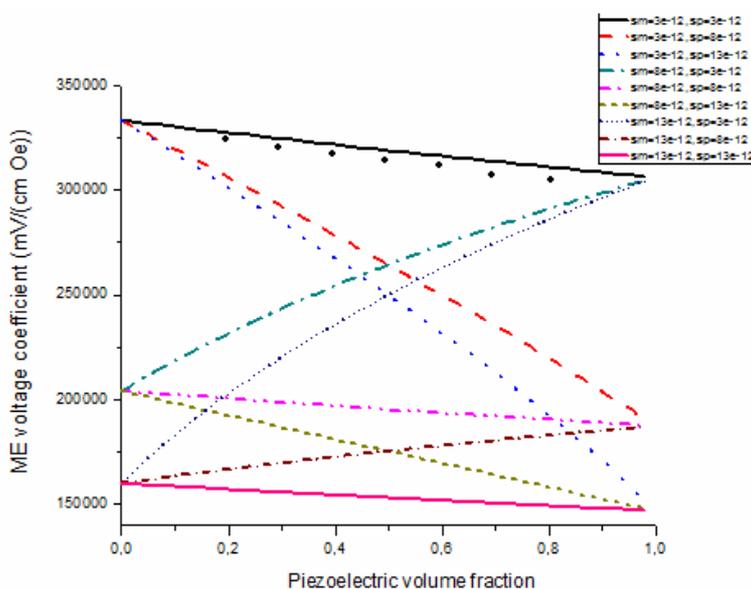


Рис.1. Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика, длина МЭ структуры 10 мм. Точки — экспериментальные данные

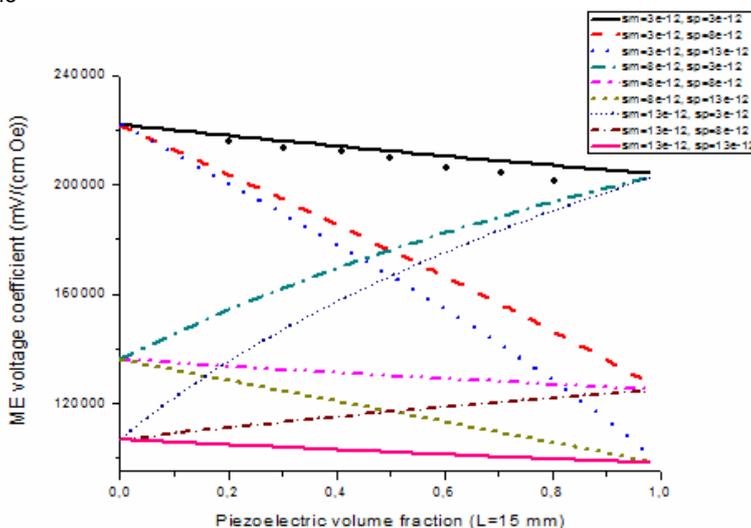


Рис.2. Зависимость поперечного МЭ коэффициента от объемной доли пьезоэлектрика, длина МЭ структуры 15 мм. Точки — экспериментальные данные

и пик МЭ коэффициента по напряжению:

$$\frac{\delta E_3}{\delta H_1} = \frac{8Q_a}{\pi^2} \frac{r^m q_{11}^p d_{31}^p / \epsilon_{33}}{(r^m s_{11} + (1-V)^p s_{11})(r+1)},$$

$$\frac{\alpha_E}{Q_a} = \frac{8}{\pi^2} \frac{V(1-V)^m q_{11}^p d_{31}^p / \epsilon_{33}}{[V^m s_{11} + (1-V)^p s_{11}]}, \quad (2)$$

где  $Q_a$  — фактор добротности для ЭМР.

Следует отметить, что уравнения (1) и (2) для резонансной частоты и МЕ коэффициента по напряжению справедливы как для двухслойных, так и для трехслойных структур. Зависимости поперечного МЕ коэффициента по напряжению от пьезоэлектрической объемной доли показаны на рис. 1 и 2.

Для экспериментального подтверждения достоверности метода номограмм в области ЭМР использовались симметричные МЭ композиты. Исходя из семейства номограмм, были выбраны магнитоэлектрические и пьезоэлектрические компоненты со значениями податливостей, при которых наблюдается максимальный МЭ эффект:  $s_m = 3 \cdot 10^{-12}$  и  $s_p = 3 \cdot 10^{-12}$ . Выбранный таким образом для исследования МЭ композит состоит из пластин пьезокерамики ЦТС-19 ( $10 \times 5 \times 0,5$  мм и  $15 \times 5 \times 0,5$  мм) и аморфного сплава метглас ( $10 \times 5 \times 0,02$  мм и  $15 \times 5 \times 0,02$  мм). Объемная доля пьезоэлектрической фазы в исследуемых композитах составляла: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8. Как видно из рисунков представленных выше, экспериментальные точки соответствуют теоретической кривой, что является подтверждением достоверности метода номограмм в области ЭМР.

### Заключение

В данной статье подтверждается адекватность метода экспресс анализа МЭ эффекта на основе номограмм. Были получены экспериментальные значения МЭ эффекта. Построенные номограммы МЭ эф-

фекта в области ЭМР для симметричных структур находятся в хорошем согласовании с экспериментальными данными.

Предложенные номограммы можно использовать для определения оптимальных характеристик МЭ композитов с целью получения максимального МЭ эффекта.

Кроме того, номограммы могут быть использованы для проверки значений МЭ эффекта, полученных при помощи других методов.

*Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания, проект №8. 11100. 2018/11. 12.*

1. Schmid H., Janner A., Grimmer H., Rivera J.-P., Ye Z.-G., eds. Proc. 2nd Int. Conf. on Magnetoelectric Interaction Phenomena in Crystals (MEIPIC-2). Ferroelectrics, 1994, vols. 161-162.
2. Bichurin M.I., ed. Proc. 3rd Int. Conf. on Magnetoelectric Interaction Phenomena in Crystals (MEIPIC-3). Ferroelectrics, 1997, vol. 204.
3. Bichurin M., Viehland D., eds. Magnetoelectricity in Composites. Pan Stanford Publishing, Singapore, 2012. 273 p.
4. Bichurin M.I., Petrov V.M. Modeling of magnetoelectric effects in composites. Springer Series in Materials Science. Vol. 201. Springer, New York, 2014. 108 p.
5. Bichurin M.I., Petrov V.M. Modeling of magnetoelectric interaction in magnetostrictive-piezoelectric composites. Advances in Condensed Matter Physics, 2012, vol. 2012, id 310.
6. Bichurin M.I., Petrov V.M. Composite magnetoelectrics: Their microwave properties. Ferroelectrics, 1994, vol. 162, pp. 33-35.
7. Muchenik T.I., Barbero E.J. Charge, voltage, and work-conversion formulas for magnetoelectric laminated composites. Smart Materials and Structures, 2015, vol. 24, id 025039.
8. Bichurin M., Petrov V., Petrov R., Tatarenko A., Leontiev V., Lavrentieva K. Nomograph method for predicting magnetoelectric coupling. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, vol. 412, pp. 1-6. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.03.070>.