

Математическое моделирование

УДК 539.3:537.633.9

ПЬЕЗОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ С МАКСВЕЛЛ-ВАГНЕРОВСКОЙ РЕЛАКСАЦИЕЙ

А. А. Паньков

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр-т, 29.

E-mails: mkmk_pr@pstu.ru

Проведён численный расчёт и анализ влияния на действительные и мнимые частоты эффективного пьезоэлектрического и пьезомагнитного коэффициентов магнитоэлектрического пьезокомпозиата (пьезоэлектрика PVF с однонаправленными ферритовыми волокнами), величины наполнения волокнами и частоты приложенного электрического поля с учётом максвелл-вагнеровской релаксации.

Ключевые слова: *пьезокомпозиат, электромагнитоупругость, эффективные свойства, максвелл-вагнеровская релаксация.*

Введение. Магнитоэлектрические материалы являются одними из наиболее перспективных функциональных материалов современной электроники. В них сочетаются диэлектрические, пьезоэлектрические, упругие, пьезомагнитные и магнитные свойства, которыми можно эффективно управлять с помощью внешних воздействий. Магнитоэлектрические константы гомогенных магнитоэлектриков очень малы, что обуславливает создание гетерогенных композиционных магнитоэлектриков [1–6], магнитоэлектрические константы которых могут на несколько порядков превосходить соответствующие константы гомогенных материалов. В магнитоэлектрических феррит-пьезоэлектрических композиатах магнитоэлектрический эффект отсутствует как в пьезоэлектрической, так и в ферритовой фазах; его возникновение в композиатах связано с пьезоэлектромагнитным взаимодействием пьезоэлектрической и ферритовой подсистем через упругие деформационные поля. Учёт проводимостей γ_f фаз ($f = 1, 2, \dots, F$) и частоты ω приложенного электрического поля через комплексную форму записи [4–10]

$$\lambda_f = \lambda'_f - i \frac{\gamma_f}{\omega} \quad (1)$$

тензоров диэлектрических проницаемостей λ_f фаз с действительными частями λ'_f приводит к комплексным значениям тензоров эффективных пьезоэлектромагнитных свойств композиата и, как следствие, к возникновению на макроуровне композиата дисперсии и энергетических потерь в переменных элек-

Андрей Анатольевич Паньков (д.ф.-м.н., доц.), профессор, каф. механики композиционных материалов и конструкций.

трических полях, известных под названием «максвелл-вагнеровская релаксация»; F — число различных фаз в композите. В [6] исследована максвелл-вагнеровская релаксация феррит-пьезоэлектрических слоистых композитов и приведен анализ концентрационных и частотных зависимостей действительных и мнимых частей эффективных электромагнитных констант. Рассмотрим применение подхода [6] к исследованию зависимостей действительных и мнимых частей эффективного пьезоэлектрического и пьезомагнитного коэффициентов однонаправленного волокнистого электромагнетика с полидисперсной матричной структурой от величины наполнения ферритовыми волокнами и частоты приложенного электрического поля на основе полученного ранее решения [3].

1. Определяющие соотношения на микро- и макроуровнях композита. Для каждой фазы $f = \overline{1, 2}$ запишем определяющие соотношения [1, 2]

$$\begin{aligned}\sigma_{ij} &= C_{(f)ijmn}\varepsilon_{mn} - e_{(f)nij}\hat{E}_n - h_{(f)nij}\hat{H}_n - \beta_{(f)ij}\Theta, \\ \hat{D}_i &= e_{(f)imn}\varepsilon_{mn} + \lambda_{(f)in}\hat{E}_n + \pi_{(f)i}\Theta, \\ \hat{B}_i &= h_{(f)imn}\varepsilon_{mn} + \mu_{(f)in}\hat{H}_n + \vartheta_{(f)i}\Theta,\end{aligned}\quad (2)$$

связывающие напряжения σ , индукции электрического \hat{D} и магнитного \hat{B} полей с деформациями ε , напряжённостями электрического \hat{E} и магнитного \hat{H} полей, однородным внешним нагревом Θ через считающиеся известными для каждой фазы f тензоры упругих свойств C_f , пьезоэлектрических e_f и пьезомагнитных h_f свойств, диэлектрических λ_f и магнитных μ_f проницаемостей, температурных коэффициентов β_f , пироэлектрических π_f и пирромагнитных ϑ_f постоянных.

Тензоры эффективных пьезоэлектромагнитных свойств: C^* , e^* , h^* , λ^* , μ^* и, дополнительно, новые тензоры χ^* , κ^* электромагнитной связи входят в определяющие соотношения на макроуровне композита:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^* &= C_{ijmn}^*\varepsilon_{mn}^* - e_{nij}^*\hat{E}_n^* - h_{nij}^*\hat{H}_n^* - \beta_{ij}^*\Theta, \\ \hat{D}_i^* &= e_{imn}^*\varepsilon_{mn}^* + \lambda_{in}^*\hat{E}_n^* + \chi_{in}^*\hat{H}_n^* + \pi_i^*\Theta, \\ \hat{B}_i^* &= h_{imn}^*\varepsilon_{mn}^* + \mu_{in}^*\hat{H}_n^* + \kappa_{in}^*\hat{E}_n^* + \vartheta_i^*\Theta,\end{aligned}\quad (3)$$

где макроскопические значения напряжений $\sigma^* = \langle \sigma \rangle$ и деформаций $\varepsilon^* = \langle \varepsilon \rangle$, индукций $\hat{D}^* = \langle \hat{D} \rangle$, $\hat{B}^* = \langle \hat{B} \rangle$ и напряжённостей $\hat{E}^* = \langle \hat{E} \rangle$, $\hat{H}^* = \langle \hat{H} \rangle$; $\langle \dots \rangle$ — оператор осреднения по области V .

Ненулевые компоненты рассматриваемых трансверсально-изотропных тензоров λ , μ , C , e , h , на микро- (2) и на макро- (3) уровнях композита можно наглядно представить в матричной форме записи:

$$\|\lambda_{ij}\| = \begin{vmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{vmatrix}, \quad \|\mu_{ij}\| = \begin{vmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{vmatrix},$$

$$\|c_{ij}\| = \left\| \begin{array}{cccccc} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1122} & C_{1111} & C_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ C_{1133} & C_{1133} & C_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{1313} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{1212} \end{array} \right\|$$

$$\|e_{ij}\| = \left\| \begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{113} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{113} & 0 & 0 \\ e_{311} & e_{311} & e_{333} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|, \quad (4)$$

$$\|h_{ij}\| = \left\| \begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0 & h_{123} & h_{113} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_{113} & -h_{123} & 0 \\ h_{311} & h_{311} & h_{333} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\|, \quad \|\beta_{ij}\| = \left\| \begin{array}{ccc} \beta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33} \end{array} \right\|,$$

$$\|\pi_i\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \pi_3 \end{array} \right\|, \quad \|\vartheta_i\| = \left\| \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ \vartheta_3 \end{array} \right\|,$$

где $c_{66} = (c_{11} - c_{12})/2$; тензорные и матричные индексы связаны между собой соотношениями: 11 \rightarrow 1, 22 \rightarrow 2, 33 \rightarrow 3, 23 и 32 \rightarrow 4, 13 и 31 \rightarrow 5, 12 и 21 \rightarrow 6.

2. Эффективные свойства электромагнетика с эллипсоидальными включениями. В [3] получено уточненное решение для тензоров эффективных пьезоэлектромагнитных свойств (3):

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^* &= \langle \mathbf{C} \rangle + \Delta^c, & \boldsymbol{\lambda}^* &= \langle \boldsymbol{\lambda} \rangle + \Delta^\lambda, & \boldsymbol{\mu}^* &= \langle \boldsymbol{\mu} \rangle + \Delta^\mu, \\ \mathbf{e}^* &= \langle \mathbf{e} \rangle + \Delta^e, & \mathbf{h}^* &= \langle \mathbf{h} \rangle + \Delta^h, & \boldsymbol{\chi}^* &= \Delta^\chi, & \boldsymbol{\kappa}^* &= \Delta^\kappa, \\ \boldsymbol{\beta}^* &= \langle \boldsymbol{\beta} \rangle + \Delta^\beta, & \boldsymbol{\pi}^* &= \langle \boldsymbol{\pi} \rangle + \Delta^\pi, & \vartheta^* &= \langle \vartheta \rangle + \Delta^\vartheta \end{aligned} \quad (5)$$

через поправки $\Delta^c, \dots, \Delta^\vartheta$ к соответствующим осреднённым по объёму значениям $\langle \mathbf{C} \rangle, \dots, \langle \vartheta \rangle$ [11–13]. Решения для тензоров поправок $\Delta^c, \dots, \Delta^\vartheta$ в [3] получены на основе новых решений для компонент тензоров сингулярных составляющих \mathbf{G}^s вторых производных для функций Грина \mathbf{G}

$$\nabla \nabla \mathbf{G}(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{(1)}) \approx \mathbf{G}^s \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{(1)}), \quad (6)$$

$$\mathbf{G} = \left\| \begin{array}{ccc} U_{ik} & U_i^{(1)} & U_i^{(2)} \\ \Phi_k & \Phi^{(1)} & \Phi^{(2)} \\ \Psi_k & \Psi^{(1)} & \Psi^{(2)} \end{array} \right\|, \quad \mathbf{G}^s = \left\| \begin{array}{ccc} U_{imjn}^s & U_{imn}^{s(1)} & U_{imn}^{s(2)} \\ \Phi_{imn}^s & \Phi_{mn}^{s(1)} & \Phi_{mn}^{s(2)} \\ \Psi_{imn}^s & \Psi_{mn}^{s(1)} & \Psi_{mn}^{s(2)} \end{array} \right\| \quad (7)$$

для однородной анизотропной пьезоэлектромагнитной среды, где $\mathbf{G} = \mathbf{G}(\boldsymbol{\rho})$, $\boldsymbol{\rho} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_1$, $\delta(\boldsymbol{\rho})$ — дельта-функция Дирака (6); в точке \mathbf{r}_1 действует единичная объёмная сила или электрический или магнитный источник, ∇ — оператор дифференцирования по координатам вектора \mathbf{r} . Компоненты матрицы \mathbf{G}^s в (6), (7) вычисляются по формулам

$$U_{imjn}^s = [\bar{U}_{ij}]_{mn}, \quad U_{imn}^{s(1)} = [\bar{U}_i^{(1)}]_{mn}, \quad U_{imn}^{s(2)} = [\bar{U}_i^{(2)}]_{mn};$$

$$\begin{aligned}\Phi_{mjn}^s &= [\bar{\Phi}_j]_{mn}, & \Phi_{mn}^{s(1)} &= [\bar{\Phi}^{(1)}]_{mn}, & \Phi_{mn}^{s(2)} &= [\bar{\Phi}^{(2)}]_{mn}; \\ \Psi_{mjn}^s &= [\bar{\Psi}_j]_{mn}, & \Psi_{mn}^{s(1)} &= [\bar{\Psi}^{(1)}]_{mn}, & \Psi_{mn}^{s(2)} &= [\bar{\Psi}^{(2)}]_{mn},\end{aligned}$$

где оператор [12]

$$[\dots]_{mn} = -\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \dots \kappa_m \kappa_n \sin \theta d\theta d\phi$$

действует на компоненты тензоров

$$\begin{aligned}\bar{U}_{ij} &= \left(\Lambda_{ij} + \frac{h_i^{(1)} h_j^{(1)}}{\lambda^{(1)}} + \frac{h_i^{(2)} h_j^{(2)}}{\lambda^{(2)}} \right)^{-1}, & \bar{U}_i^{(1)} &= \bar{U}_{ij} \frac{h_j^{(1)}}{\lambda^{(1)}}, & \bar{U}_i^{(2)} &= \bar{U}_{ij} \frac{h_j^{(2)}}{\lambda^{(2)}}, \\ \bar{\Phi}_j &= \frac{h_i^{(1)}}{\lambda^{(1)}} \bar{U}_{ij}, & \bar{\Psi}_j &= \frac{h_i^{(2)}}{\lambda^{(2)}} \bar{U}_{ij}, & \bar{\Phi}^{(1)} &= \left(h_i^{(1)} \bar{U}_i^{(1)} - 1 \right) \frac{1}{\lambda^{(1)}}, \\ \bar{\Psi}^{(1)} &= h_i^{(2)} \bar{U}_i^{(1)} \frac{1}{\lambda^{(2)}}, & \bar{\Phi}^{(2)} &= h_i^{(1)} \bar{U}_i^{(2)} \frac{1}{\lambda^{(1)}}, & \bar{\Psi}^{(2)} &= \left(h_i^{(2)} \bar{U}_i^{(2)} - 1 \right) \frac{1}{\lambda^{(2)}},\end{aligned}$$

в которых использованы обозначения

$$\begin{aligned}\Lambda_{ij} &= C_{imjn}^\bullet \kappa_m \kappa_n, \\ h_i^{(1)} &= e_{\min}^\bullet \kappa_m \kappa_n, & h_i^{(2)} &= h_{\min}^\bullet \kappa_m \kappa_n, \\ \lambda^{(1)} &= \lambda_{mn}^\bullet \kappa_m \kappa_n, & \lambda^{(2)} &= \mu_{mn}^\bullet \kappa_m \kappa_n, \\ \kappa_1 &= \frac{1}{a_1} \sin \theta \cos \phi, & \kappa_2 &= \frac{1}{a_2} \sin \theta \sin \phi, & \kappa_3 &= \frac{1}{a_3} \cos \theta,\end{aligned} \quad (8)$$

а ϕ и θ — полярные углы в сферической системе координат. Поверхность эллипсоидального «зерна неоднородности» [12] задана равенством

$$\sum_{i=1}^3 \left(\frac{x_i}{a_i} \right)^2 = 1$$

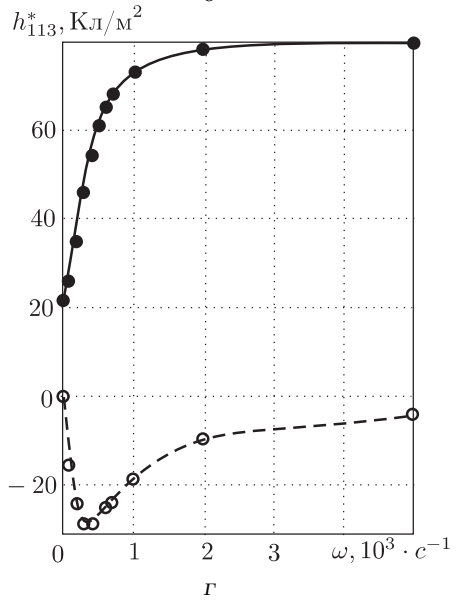
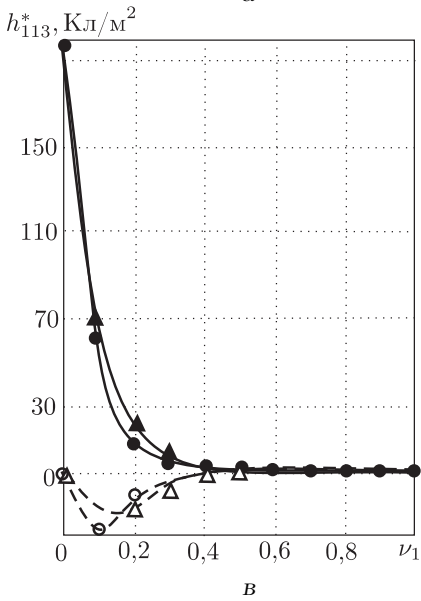
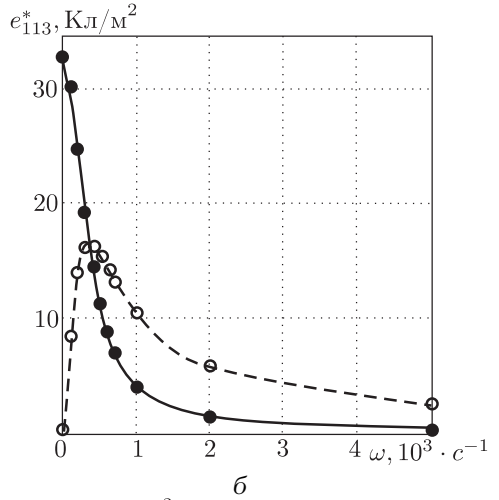
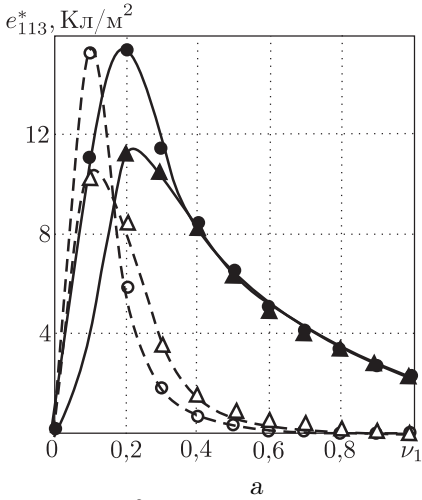
через значения главных полуосей a_i , $x_i = r_{(1)i} - r_i$ — координаты вектора \mathbf{x} , тензоры \mathbf{C}^\bullet , \mathbf{e}^\bullet , \mathbf{h}^\bullet , $\boldsymbol{\lambda}^\bullet$, $\boldsymbol{\mu}^\bullet$ задают свойства «среды сравнения» [12]. Варьирование свойствами среды сравнения позволяет получать различные решения; например, в [12] без учёта пьезоактивности из обобщённого сингулярного приближения получены известные решения Фойгта—Рейсса, Хашина—Штрикмана и самосогласованное решение [14].

3. Численный расчёт. Проведём численный анализ (5) влияния на действительные и мнимые части эффективного комплексного пьезоэлектрического e_{113}^* и пьезомагнитного h_{113}^* коэффициентов

$$e_{113}^* = e'_{113} - ie''_{113}, \quad h_{113}^* = h'_{113} - ih''_{113} \quad (9)$$

однонаправленного волокнистого электромагнетика с полидисперсной матричной структурой [14]: пьезоэлектрик PVF (1-я фаза) с ферритовыми волокнами (2-я фаза) величины v_1 и частоты ω приложенного электрического поля. Решение для тензоров \mathbf{C}^* , \dots , ϑ^* полидисперсной структуры получим из обобщенного сингулярного приближения (5) [3], приняв в (8) равенства

$$\mathbf{C}^\bullet = \mathbf{C}_1, \quad \mathbf{e}^\bullet = \mathbf{e}_1, \quad \mathbf{h}^\bullet = \mathbf{h}_1, \quad \boldsymbol{\lambda}^\bullet = \boldsymbol{\lambda}_1, \quad \boldsymbol{\mu}^\bullet = \boldsymbol{\mu}_1,$$



Зависимости действительной (сплошная линия) и мнимой (штриховая линия) частей пьезоэлектрического e_{113}^* (а, б) и пьезомагнитного h_{113}^* (в, г) коэффициентов композита от объемной доли ν_1 пьезоэлектрика при круговой частоте электрического поля $\omega = 500 \text{ c}^{-1}$ (о), 1000 c^{-1} (Δ) (а, в) и от ω при $\nu_1 = 0,1$ (б, г)

т.е. свойства среды сравнения приравниваем к свойствам пьезоэлектрика PVF; для волокон: $a_1 = a_2$, $a_3 \rightarrow \infty$ (8). Независимые упругие, диэлектрические и пьезомеханические постоянные трансверсально-изотропных электроупругих свойств волокон (полимерного пьезоэлектрика PVF с осью симметрии r_3) приведены в [13, 15]. Необходимые для расчёта κ_{11}^* , e_{113}^* , λ_{11}^* в (9) константы (4) пьезоэлектрической фазы PVF следующие: продольный модуль сдвига $C_{(1)1313} = 0,10 \cdot 10^{10}$ Па, действительная часть диэлектрической проницаемости $\lambda'_{(1)11} = 14,7\lambda_0$, пьезоэлектрическая постоянная $e_{(1)113} = 2,3$ Кл/м², диэлектрическая проницаемость вакуума $\lambda_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $h_{(1)113} = 0$. Для пьезомагнитной ферритовой фазы (4) [13] константы следующие: $C_{(2)1313} = 5,5 \cdot 10^{10}$ Па, $h_{(2)113} = 200$ Тл, $\mu_{(2)11} = 3,14 \cdot 10^{-5}$ Тл·м/А, $e_{(2)113} = 0$. Дополнительно примем следующие значения: проводимость $\gamma_{(1)11}$ полимерного пьезоэлектрика PVF приравняем к проводимости полиэтилена 10^{-10} (Ом·м)⁻¹ [7], проводимость феррита $\gamma_{(2)11}$ — к значению 10^{-5} (Ом·м)⁻¹ [6] и $\lambda'_{(2)11} = 10\lambda_0$ [4] для никелевой феррошпинели (1); проницаемость $\mu_{(1)11}$ — к магнитной постоянной вакуума $\mu_0 \approx 1,256 \cdot 10^{-6}$ Тл·м/А.

На рисунке представлены результаты расчёта действительных и мнимых частей эффективного комплексного пьезоэлектрического e_{113}^* и пьезомагнитного h_{113}^* коэффициентов полидисперсного волокнистого композита PVF/феррит: пьезоэлектрическая PVF матрица с ферритовыми волокнами. Времена релаксации τ_κ и релаксационные частоты $\omega_\kappa = 1/\tau_\kappa$, соответствующие максимумам мнимых частей $\kappa_{11}''^*$, $e_{113}''^*$, $h_{113}''^*$, $\lambda_{11}''^*$, $\mu_{11}''^*$, изменяются в широких пределах варьированием объёмными долями и свойствами фаз [6]. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами как аналитических [7, 8], так и экспериментальных [7, 8] исследований.

Заключение. Проведён численный расчёт и анализ влияния на действительные e_{113}^* , h_{113}^* и мнимые $e_{113}''^*$, $h_{113}''^*$ части эффективного комплексного пьезоэлектрического e_{113}^* и пьезомагнитного h_{113}^* коэффициентов полидисперсного магнитоэлектрического пьезокомпозита PVF/феррит величины v_1 и частоты ω электрического поля. Для концентрационных (рисунок а, в) зависимостей действительных и мнимых частей эффективных констант характерны экстремумы, например, при малой объёмной доле $v_1 \approx 0,1$ и $\omega = 500$ ⁻¹. Для частотной зависимости величины e_{113}^* (рисунок, б) характерна глубокая нормальная релаксация, обусловленная тем, что на высоких частотах не успевает накапливаться объёмный заряд вблизи межфазных границ; при нормальной релаксации абсолютные значения действительных частей монотонно уменьшаются с ростом частоты, тогда как для мнимых частей характерны четко выраженные релаксационные экстремумы [4]. Отметим, что для пьезомагнитного модуля h_{113}^* (рисунок, г) наблюдается обратная релаксация. Релаксационные частоты ω_κ растут с увеличением объёмной доли пьезоэлектрика PVF в композите.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ-Урал № 10-01-96047-р_урал_a.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В. З. Партон, Б. А. Кудрявцев, Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. М.: Наука, 1988. 471 с.; англ. пер.: V. Z. Parton, B. A. Kudryavtsev,

- Electromagnetoelasticity, Piezoelectrics and Electrically Conductive Solids. New York: Gordon and Breach, 1988. 503 pp.
2. И. П. Гетман, “О магнитоэлектрическом эффекте в пьезокомпозитах” // *ДАН СССР*, 1991. Т. 317, № 2. С. 1246–1259; англ. пер.: I. P. Getman, “Magnetolectric effect in piezoelectric composites” // *Soviet Physics Doklady*, 1991. Vol. 36. Pp. 233.
 3. А. А. Паньков, “Коэффициенты электромагнитной связи композита с пьезоактивными фазами” // *Физ. мезомех.*, 2011. Т. 14, № 2. С. 93–99. [А. А. Pan'kov, “Coefficients of electromagnetic coupling of composite with piezoactive phases” // *Fiz. mezomekh.*, 2011. Vol. 14, no. 2. Pp. 93–99].
 4. А. В. Турик, А. И. Чернобабов, М. Ю. Родинин, Е. А. Толокольников, “Магнитоэлектричество в двумерных статистических смесях” // *ФТТ*, 2009. Т. 51, № 7. С. 1395–1397; англ. пер.: A. V. Turik, A. I. Chernobabov, M. Yu. Rodinin, E. A. Tolokol'nikov, “Magnetolectricity in two-dimensional statistical mixtures” // *Phys. Sol. State*, 2009. Vol. 51, no. 7. Pp. 1478–1481.
 5. А. В. Турик, А. И. Чернобабов, М. Ю. Родинин, “Гетерогенные мультиферроики: магнитоэлектричество и пьезоэффект” // *ФТТ*, 2009. Т. 51, № 8. С. 1580–1583; англ. пер.: A. V. Turik, A. I. Chernobabov, M. Yu. Rodinin, “Heterogeneous multiferroics: Magnetolectricity and piezoelectric effect” // *Phys. Sol. State*, 2009. Vol. 51, no. 8. Pp. 1675–1678.
 6. В. М. Петров, М. И. Бичурин, G. Srinivasan, “Максвелл-вагнеровская релаксация в магнитоэлектрических композиционных материалах” // *Письма в ЖТФ*, 2004. Т. 30, № 8. С. 81–87; англ. пер.: V. M. Petrov, M. I. Bichurin, G. Srinivasan, “Maxwell–Wagner relaxation in magnetolectric composites” // *Tech. Phys. Lett.*, 2004. Vol. 30, no. 4. Pp. 341–344.
 7. Г. С. Радченко, А. В. Турик, “Гигантский пьезоэлектрический эффект в слоистых композитах сегнетоэлектрик-полимер” // *ФТТ*, 2003. Т. 45, № 9. С. 1676–1679; англ. пер.: G. S. Radchenko, A. V. Turik, “Giant piezoelectric effect in layered ferroelectric-polymer composites” // *Phys. Sol. State*, 2003. Vol. 45, no. 9. Pp. 1759–1762.
 8. А. И. Чернобабов, А. В. Турик, Е. А. Толокольников, М. Ю. Родинин, Г. И. Темірчев, “Хаотическая динамика в пьезоактивных статистических смесях” // *ФТТ*, 2009. Т. 51, № 7. С. 1419–1421; англ. пер.: A. I. Chernobabov, A. V. Turik, E. A. Tolokol'nikov, M. Yu. Rodinin, G. I. Temirchev, “Chaotic dynamics in piezoelectrically active statistical mixtures” // *Phys. Sol. State*, 2009. Vol. 51, no. 7. Pp. 1507–1509.
 9. В. А. Соцков, “Экспериментальная оценка концентрационной зависимости действительной части диэлектрической проницаемости в неупорядоченной макросистеме парафин-графит” // *Письма в ЖТФ*, 2004. Т. 30, № 12. С. 1–5; англ. пер.: V. A. Sotskov, “Experimental study of the concentration dependence of the real part of permittivity in a paraffin-graphite disordered macrosystem” // *Tech. Phys. Lett.*, 2004. Vol. 30, no. 6. Pp. 487–488.
 10. А. Н. Ульзутуев, Н. М. Ушаков, “Диэлектрическая проницаемость нанонаполненного полиметилметакрилата и ее изменение с ростом температуры” // *Письма в ЖТФ*, 2012. Т. 38, № 5. С. 91–96; англ. пер.: A. N. Ul'zutuev, N. M. Ushakov, “Temperature dependence of the dielectric permittivity of poly(methyl methacrylate) filled with metal nanoparticles” // *Tech. Phys. Lett.*, 2012. Vol. 38, no. 3. Pp. 245–247.
 11. А. А. Паньков, Статистическая механика пьезокомпозитов. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. 480 с. [А. А. Pan'kov, Statistical Mechanics of Piezocomposites. Perm: Perm. Gosud. Universitet, 2009. 480 pp.]
 12. Т. Д. Шермергор, Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1976. 399 с. [T. D. Shermergor, Theory of Elasticity of Microinhomogeneous Media. Moscow: Nauka, 1976. 399 pp.]
 13. Л. П. Хорошун, Б. П. Маслов, П. В. Лещенко, Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с. [L. P. Khoroshun, B. P. Maslov, P. V. Leshchenko, Prediction of the Effective Properties of Piezoactive Composite Materials. Kiev: Naukova Dumka, 1989. 208 pp.]

14. *R. M. Christensen*, Mechanics of composite materials. New York: Wiley-Interscience, 1979. 348 pp.; русск. пер.: *Р. Кристенсен*, Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
15. *G. M. Sessler*, "Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride" // *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981. Vol. 70, no. 6. Pp. 1596–1608.

Поступила в редакцию 04/XI/2012;
в окончательном варианте — 27/XI/2012.

MSC: 74A40

PIEZOMECHANICAL PROPERTIES OF MAGNETO ELECTRIC COMPOSITES WITH MAXWELL–WAGNER RELAXATION

A. A. Pan'kov

Perm State National Research Polytechnical University,
29, Komsomolskiy pr., 614990, Perm, Russia.

E-mails: mkmk_pr@pstu.ru

The numerical calculation and the analysis of influence on the real and imaginary parts of effective piezoelectric and piezomagnetic factors of magnetoelectric piezocomposite (is PVF with unidirectional ferrite fibers) of size of filling by fibers and of frequency of the enclosed electric field taking into account Maxwell–Wagner relaxation are carried out.

Key words: *piezocomposite, electro-magnetic elasticity, effective properties, Maxwell–Wagner relaxation.*

Original article submitted 04/XI/2012;
revision submitted 27/XI/2012.