

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДАТЧИКОВ С ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Юрин В.А.

Самарский государственный технический университет, Самара

Ключевые слова: неосесимметричная задача термоэлектроупругости, многослойный цилиндр, биортогональные конечные интегральные преобразования, преобразования Фурье, пьезокерамика, температурный датчик.

Аннотация. В настоящей работе описана расчетная модель температурного датчика в виде длинного полого многослойного цилиндра с чувствительным элементом из пьезокерамики. Начально-краевая задача решена при помощи биортогональных конечных интегральных преобразований. Результаты расчета позволили не только описать все компоненты термоэлектроупругих полей в многослойном цилиндре, но и определить оптимальную конфигурацию слоёв конструкции для повышения эффективности температурного датчика.

ON IMPROVING THE EFFICIENCY OF MULTI-LAYERED TEMPERATURE SENSORS WITH A PIEZOCERAMIC SENSING ELEMENT

Yurin V.A.

Samara State Technical University, Samara

Keywords: non-axisymmetric thermoelectroelasticity problem, multi-layered cylinder, biorthogonal finite integral transforms, Fourier transforms, piezoceramics, temperature sensor.

Abstract. In this work, a computational model of a temperature sensor is described in the form of a long hollow multi-layered cylinder with a piezoceramic sensing element, with a non-axisymmetric thermal impact on the inner surface of the structure. The initial-boundary value problem is solved by applying biorthogonal finite integral transforms. The calculation results describe all the components of the thermoelectroelastic fields in the multi-layered cylinder as well as determine the optimal layers configuration in the structure to enhance the efficiency of the temperature sensor.

Введение. Повышение эффективности температурных датчиков, чувствительные элементы которых изготовлены из пьезокерамики, может быть достигнуто за счет использования многослойных конструкций [1, 2]. Однако данное конструктивное решение сопровождается вопросами о подборе материала слоев, их толщины, а также порядке расположения в составе конструкции таким образом, чтобы максимально увеличить амплитуду электрического напряжения, возникающего в результате прямого пьезоэффекта. Решение перечисленных проблем является целью данного исследования.

Формулировка задачи. Для примера расчета принимается длинная полая трехслойная конструкция ($j = 1...3$ – номера слоев). Чувствительный элемент располагается в среднем слое ($j = 2$) и состоит из анизотропного пьезоэлектрического материала, тогда как внешние слои ($j = 1, 3$) состоят из изотропных материалов (см. рис. 1).

На внутренней поверхности полого многослойного цилиндра ($r_* = a_1$) действует неосесимметричная нестационарная функция температуры $\omega_1^*(\varphi, t_*)$. На

внешней поверхности ($r_* = b$) – задан закон конвективного теплообмена. Температура окружающей среды определена переменной ϑ^* . Чувствительный элемент имеет электродное покрытие и подключен вольтметру, причем электрод по поверхности $r_* = a_2$ заземлен. Здесь и далее символом «*» обозначены переменные в размерной форме.

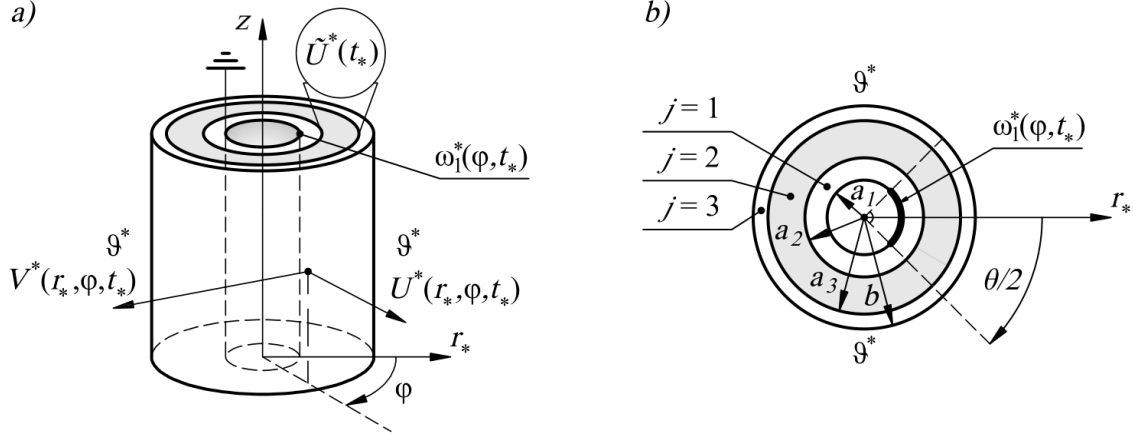


Рис. 1. Принципиальная схема многослойного датчика: а) в изометрии; б) в поперечном сечении

Математическая формулировка задачи в безразмерном виде (начально-краевые условия опущены):

– для пьезокерамики:

$$L_{m+1}(U) + L_{m+2}(V) + L_{m+3}(\Phi) + L_{m+4}(\Theta) = 0, \text{ при } m = 0, 4, 8, \quad (1)$$

$$L_{13}(\Theta) - \frac{\partial}{\partial t} \left(\Theta + a_{12} \nabla U + a_{12} \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} - a_{13} \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) = 0; \quad (2)$$

– для изотропных материалов:

$$L_{m+14}^{(j)}(U) + L_{m+15}^{(j)}(V) + L_{m+16}^{(j)}(\Theta) = 0, \text{ при } m = 0, 3, \quad (3)$$

$$L_{13}(\Theta) - \frac{\partial}{\partial t} \left[b_5^{(j)} \Theta + b_6^{(j)} \left(\nabla U + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) \right] = 0; \quad (4)$$

В выражениях (1)-(4): $L_1 \dots L_{19}$ – дифференциальные операторы;

$$\{U, V, r\} = \{U^*, V^*, r_*\} / b, \quad \Phi = \frac{e_{33}}{bc_{33}} \Phi^*, \quad \Theta = \frac{\gamma_{33}}{c_{33}} (\Theta^* - T_0), \quad t = \frac{\Lambda^{(2)}}{k^{(2)} b^2} t_*;$$

$$a_{12} = T_0 \frac{\gamma_{33}^2}{c_{33} k^{(2)}}; \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r}; \quad a_{13} = T_0 \frac{\gamma_{33} g_3}{k^{(2)} e_{33}}; \quad b_5^{(j)} = \frac{\Lambda^{(2)} k^{(j)}}{\Lambda^{(j)} k^{(2)}}, \quad b_6^{(j)} = T_0 \frac{\gamma^{(j)} \gamma_{33} \Lambda^{(2)}}{k^{(2)} c_{33} \Lambda^{(j)}};$$

$$\gamma_{33} = c_{33} \alpha_t^{(2)}; \quad \gamma^{(j)} = E^{(j)} (1 - 2\nu^{(j)})^{-1} \alpha_t^{(j)}.$$

Здесь U^* , V^* , Φ^* , Θ^* – компоненты вектора перемещений, потенциал электрического поля и приращение температуры тела; T_0 – начальная температура тела; e_{33} , c_{33} – пьезомодуль и модуль упругости пьезокерамического материала; γ_{33} , $\gamma^{(j)}$ – компоненты тензора температурных напряжений; $E^{(j)}$, $\nu^{(j)}$ – модуль упругости и коэффициент Пуассона изотропных материалов; $\Lambda^{(j)}$, $k^{(j)}$,

$\alpha_t^{(j)}$ – коэффициенты теплопроводности, объемной теплоемкости и линейного температурного расширения; g_3 – компонента тензора пироккоэффициентов.

Результаты расчета. При решении начально-краевой задачи применяются косинус- и синус-преобразования Фурье [3] по угловой координате φ , а также структурный алгоритм биортогонального конечного интегрального преобразования [4] по радиальной координате r .

Окончательные выражения для радиальных и окружных компонент вектора перемещений, электрического потенциала и приращения температуры записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} U(r, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left[\sum_{j=1}^3 P_1^{(j)}(r, n, t) X^{(j)}(r) + \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_{in}, n, t) N_1(\mu_{in}, r) \|K_{in}\|^{-2} \right] \cos(n\varphi) d\varphi, \\ V(r, \varphi, t) &= \pi^{-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^3 P_2^{(j)}(r, n, t) X^{(j)}(r) + \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_{in}, n, t) N_2(\mu_{in}, r) \|K_{in}\|^{-2} \right] \sin(n\varphi) d\varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Phi(r, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left[\sum_{j=1}^3 P_3^{(j)}(r, n, t) X^{(j)}(r) + \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_{in}, n, t) N_3(\mu_{in}, r) \|K_{in}\|^{-2} \right] \cos(n\varphi) d\varphi, \\ \Theta(r, \varphi, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} \Omega_n \left[\sum_{j=1}^3 P_4^{(j)}(r, n, t) X^{(j)}(r) + \sum_{i=1}^{\infty} G(\lambda_{in}, n, t) N_4(\mu_{in}, r) \|K_{in}\|^{-2} \right] \cos(n\varphi) d\varphi. \end{aligned}$$

В выражениях (5): $\Omega_n = (2\pi)^{-1}$ при $n=0$, $\Omega_n = \pi^{-1}$ при $n \neq 0$; $P_1^{(j)} \dots P_4^{(j)}$, $X^{(j)}$ – стандартизирующие функции; G – трансформанта температурной «нагрузки»; $N_1 \dots N_4$ – инвариантные компоненты конечного интегрального преобразования; λ_{in} , μ_{in} – собственные значения; $\|K_{in}\|$ – норма ядра преобразования.

Обработка результатов. За образец принят длинный полый трехслойный цилиндр ($b = 0,02$ м, $a_2 = 0,0175$ м, $a_1 = 0,0075$ м, $a = 0,005$ м). В качестве материала наружных слоев используются сталь и пластик. Материалом чувствительного элемента служит пьезокерамика PZT-4.

На рисунке 2 изображены графики приращения температуры $\Theta^*(r, 0, t_*)$, а также перемещений вдоль радиуса $U(r, 0, t_*)$ по радиальной координате r в многослойной конструкции в различные моменты времени.

Анализ полученных графиков позволяет сделать следующие выводы:

– наиболее быстро прогревается первый слой из стали, имеющей наибольший коэффициент теплопроводности; слой пластика, напротив, обладая теплоизоляционными свойствами, увеличивает время прогрева конструкции до момента стабилизации температурного поля при $t^* = 500t_{\max}^*$ (см. рис. 2, а);

– наибольшие значения радиальных перемещений возникают во внешних слоях конструкции, которые обладают более высокими коэффициентами температурного расширения, чем пьезокерамика (см. рис. 2, б).

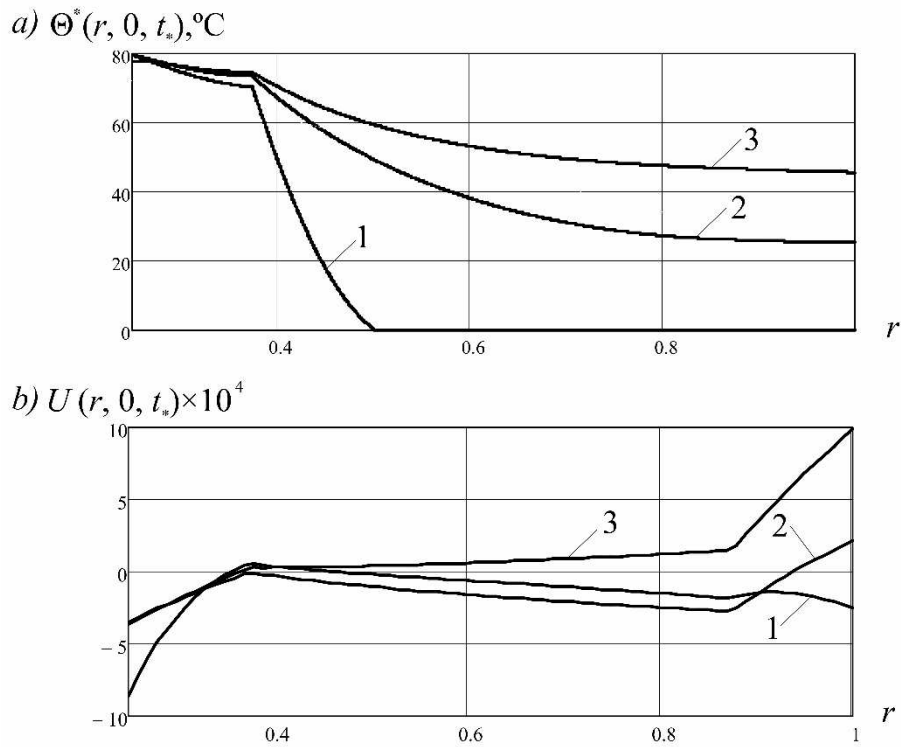


Рис. 2. Зависимости а) Θ^* и б) U от r при: 1 – $t^* = t_{\max}^*$; 2 – $t^* = 100t_{\max}^*$; 3 – $t^* = 500t_{\max}^*$

Как было отмечено ранее, эффективность температурного датчика с пьезокерамическим чувствительным элементом определяется амплитудой электрического напряжения, возникающего в результате пьезоэффекта. На рисунке 3 приведены графики изменения электрического напряжения $\tilde{U}(t)$ в чувствительном слое при различных конфигурациях многослойной конструкции.

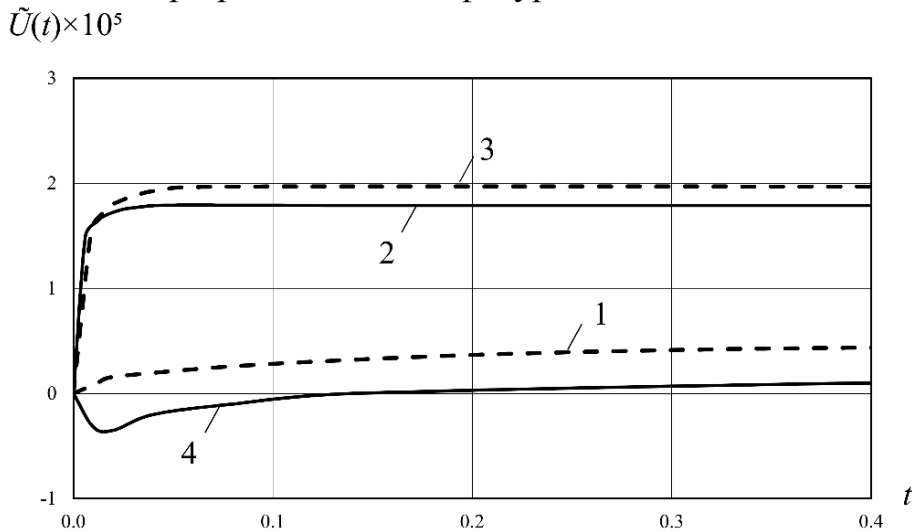


Рис. 3. Зависимость электрического напряжения $\tilde{U}(t)$ от времени: 1) один пьезокерамический слой; 2) три слоя – сталь, пьезокерамика, пластик; 3) два слоя – сталь, пьезокерамика; 4) два слоя – пьезокерамика, пластик

Выводы. Наличие в конструкции слоя из стали с высокими коэффициентами теплопроводности и линейного температурного расширения приводит к росту амплитудных значений электрического напряжения $\tilde{U}(t)$, в то время как слой из пластика, обладающего теплоизоляционными свойствами,

замедляет процесс стабилизации температурного поля в конструкции и не оказывает положительного влияния на качество пьезоэффекта.

Список литературы

1. Ионов Б.П., Ионов А.Б. Спектрально-статистический подход к бесконтактному измерению температуры // Датчики и системы. – 2009. – №2. – С. 9-11.
2. Паньков А.А. Резонансная диагностика распределения температуры пьезоэлектrolюминесцентным оптоволоконным датчиком по решению интегрального уравнения Фредгольма // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – №2. – С. 72-82. – DOI: 10.15593/perm.mech/2018.2.07.
3. Снеддон И.Н. Преобразования Фурье. – М.: Иностранная литература, 1955. – 668 с.
4. Сеницкий Ю.Э. Биортогональное многокомпонентное конечное интегральное преобразование и его приложение к краевым задачам механики // Известия вузов. Математика. – 1996. – №8. – С. 71-81.

Сведения об авторе:

Юрин Владимир Андреевич – аспирант, ассистент кафедры «Строительная механика, инженерная геология, основания и фундаменты».