

УДК 537.8

МАКСВЕЛЛ-ВАГНЕРОВСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОМ ОПТОВОЛОКОННОМ ДАТЧИКЕ ВИБРОДАВЛЕНИЯ

А. А. Паньков

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

Статья поступила в редакцию 17 октября 2017 г.

Аннотация. Разработана математическая модель пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика, в котором механолюминесцентный эффект возникает в результате взаимодействия между собой электролюминесцентного и пьезоэлектрического слоев поверх оптоволоконна, для диагностики распределения по длине датчика амплитуды стационарного вибрационного давления. Разработан алгоритм нахождения функции распределения амплитуды давления по длине датчика по результатам замеряемой на торцевом сечении датчика интенсивности исходящего из оптоволоконной фазы света для случая нелинейной «функции свечения» - зависимости интенсивности света от действующего на электролюминесцентный электронапряжения. Задача сведена к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода с разностным ядром, зависящим от рассчитываемых эффективных параметров датчика и от производной заданной «функции свечения» электролюминесцентного элемента. Проведен анализ влияния максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей в элементах структуры электролюминесцентного оптоволоконного датчика и частоты диагностируемого вибродавления на управляющие и информативные коэффициенты датчика.

Ключевые слова: пьезоэлектрoупругость, механолюминесцентный эффект, оптоволоконно, датчик давления, Максвелл-Вагнеровская релаксация.

Abstract:

The algorithm of finding of function of distribution of amplitude of the vibration pressure longwise three-phase fiber optic sensor by results of the intensity of light

proceeding from a fiber optic phase measured on the edge section of the sensor is developed for a case of nonlinear "function of a luminescence", which is the dependence of intensity of light on voltage operating on a luminescent element. The problem is reduced to the solution of the Fredholm integral equation of the 1st kind with the differential kernel depending on the calculated effective parameters of the sensor and on the derivative set function of a luminescent element. The analysis of influence of Maxwell-Wagner relaxation of electric fields in the structure elements of the fiber-optical sensor and the influence of frequency of the diagnosed vibration pressure upon the operating and informative coefficients of the sensor are carried out.

Key words: piezo-electro-elasticity, mechanical-luminescent effect, optical fiber, sensor of pressure, Maxwell-Wagner relaxation.

Введение

Ранее в [1, 2] рассмотрена математическая модель функционирования пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика давления в статической постановке без учета релаксации пьезоэлектрических зарядов, когда «времена релаксаций» [3] зарядов существенно больше времени прохождения сканирующих электрических сигналов по всей длине управляющих электродов датчика. Значения электрического напряжения U_* на каждом локальном участке электролюминесцентного слоя датчика рассчитываются [2] через управляющий a_1 и информативный a_2 передаточные коэффициенты датчика с учетом диагностируемого давления σ_* на соответствующем локальном участке внешней цилиндрической границы датчика и заданного управляющего электронапряжения $U_{упр}$ между внутренним и наружным электродами датчика.

Учет проводимостей элементов датчика приводит к релаксации электрических зарядов в пьезоэлектрическом слое и, как следствие, релаксации электронапряжения U_* на локальных участках электролюминесцентного слоя датчика. Отметим, что в [3] исследовано решение дифференциального уравнения для выходного напряжения пьезоэлектрического датчика давления в

зависимости от вида функции, в частности, длительности импульса действующего давления, параметров чувствительного элемента и измерительной цепи датчика. В результате, учет проводимостей элементов датчика приводит к релаксационным зависимостям от времени t информативных передаточных коэффициентов $a_2 = a_2(t)$ и, как следствие, результирующих значений электронапряжений $U_{\bullet} = U_{\bullet}(t)$ на локальных участках электролюминесцентного слоя датчика.

Для рассматриваемого случая диагностирования меняющихся во времени t стационарных и неоднородных по длине z датчика вибродавлений $\sigma_{\bullet}(z,t)$ учет проводимостей γ_f и круговой частоты ω возникающих в результате прямого пьезоэффекта электрических полей в фазах датчика осуществим через комплексную форму записи диэлектрических проницаемостей фаз [4]

$$\lambda_f = \lambda'_f - i\gamma_f / \omega \quad (1)$$

с действительными частями λ'_f и удельными проводимостями γ_f фаз ($f = \overline{1,3}$), что приводит к комплексным значениям управляющих a_1 и информативных a_2 передаточных коэффициентов датчика [2] и к возникновению у датчика дисперсии и энергетических потерь, известных под названием «максвелл-вагнеровская релаксация» [4-8].

Цель работы – изучение закономерностей частотных зависимостей действительных и мнимых частей управляющих и информативных передаточных коэффициентов пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика [1] для диагностирования стационарных полей вибродавлений с учетом максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей в элементах структуры на основе полученного ранее решения [2].

1. Оптоволоконный пьезоэлектролюминесцентный датчик давления

Датчик давления (рис.1) [1, 2], представляет собой составное трехфазное волокно: оптоволоконная фаза 1, электролюминесцентная (светодиодная) 2 и пьезоэлектрическая с радиальной поляризацией 3 фазы, с внутренним фотопрозрачным (перфорированным) 4 и внешним 5 управляющими

электродами. Действие напряжений σ_* на некоторый локальный участок внешней боковой поверхности датчика приводит к локальной деформации пьезоэлектрического слоя 3 и появлению в нем и в смежном с ним электролюминесцентном слое 2 электрического поля, приводящем к информативному свечению соответствующего локального участка электролюминесцентного слоя во внутрь оптоволокну 1. Далее, интегральный световой поток интенсивностью I , образованный всеми светящимися локальными участками электролюминесцентного слоя 2 передается к приемнику-анализатору (☀), установленному на выходе из оптоволокну. Величина интенсивности света I на выходе из оптоволокну управляется посредством варьирования электрическим напряжением $U_{упр}$ на управляющих электродах 4, 5.

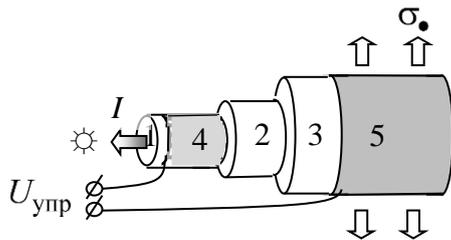


Рис.1 Фрагмент датчика с диагностируемым вибродавлением σ_* по анализу интенсивности света I на выходе из оптоволокну

Осесимметричная математическая модель датчика давления (рис.1) представляет собой трехфазный коаксиальный цилиндр, состоящий из соосно расположенных центрального оптоволокну (1-я фаза, $r < r_{(1)}$), электролюминесцентного (2-я фаза, $r_{(1)} < r < r_{(2)}$) и пьезоэлектрического (3-я фаза, $r_{(2)} < r < r_{(3)}$) слоев, разделенных внутренним перфорированным фотопрозрачным (между 1-й и 2-й фазами, $r = r_{(1)}$) и внешним ($r = r_{(3)}$) управляющими электродами; толщины электродов считаем пренебрежимо малыми по отношению к характерным размерам сечения модели в цилиндрической системе координат r, θ, z . На границе с радиусом $r_{(1)}$ между 1-й и 2-й фазами (внутреннем электроде) задан потенциал $\tilde{\phi}_1$, на внешней границе

составного волокна с радиусом $r_{(3)}$ заданы потенциал $\tilde{\varphi}_2$ и диагностируемое радиальное напряжение σ_{\bullet} , электрическое напряжение на управляющих электродах $U_{\text{упр}} \equiv \tilde{\varphi}_1 - \tilde{\varphi}_2$. Считаем, что на всех двух межфазных цилиндрических концентрических границах с радиусами: $r_{(1)}$, $r_{(2)}$ выполняются условия непрерывности радиальных перемещений u_r , напряжений σ_{rr} и, дополнительно, на границе 2-й и 3-й фаз $r_{(2)}$ выполняется условие непрерывности радиальной индукции \hat{D}_r электрического поля. В [2] получено аналитическое решение такой осесимметричной краевой задачи электроупругости для деформационных и электрических полей внутри датчика (рис.1) в статической постановке без учета проводимости элементов датчика; в результате, электрическое напряжение на локальном участке с координатой z электролюминесцентного слоя датчика рассчитывается

$$U_{\bullet} = a_1 U_{\text{упр}} + a_2 \sigma_{\bullet} \quad (2)$$

через действующее на соответствующем локальном участке внешней цилиндрической границы датчика давление σ_{\bullet} и заданное управляющее напряжение $U_{\text{упр}}$ между внутренним и наружным электродами датчика.

2. Алгоритм расчета функции распределения амплитуд вибродавления по интенсивности света на выходе оптоволокна

Рассмотрим вероятностную модель, в которой распределение действующего на боковую цилиндрическую поверхность волоконного датчика внешнего напряжения (давления) по координате z описываем случайным полем

$$\sigma_{\bullet} = \tilde{\sigma}_{\bullet}(z) \cos \omega t \quad (3)$$

со свойствами статистической однородности и эргодичности на некоторой представительной длине; электрическое напряжение U_{\bullet} на электролюминесцентном слое датчика также является случайной величиной, связанной с амплитудой напряжения $\tilde{\sigma}_{\bullet} = \tilde{\sigma}_{\bullet}(z)$ (3) зависимостью

$$U_{\bullet} = a_{1t} \tilde{U}_{\text{упр}} + a_{2t} \tilde{\sigma}_{\bullet} \quad (4)$$

с учетом заданного (постоянного по длине датчика) управляющего электронапряжения

$$U_{\text{упр}} = \tilde{U}_{\text{упр}} \cos \omega t \quad (5)$$

с амплитудой $\tilde{U}_{\text{упр}}$, управляющий a_{1t} и информативный a_{2t} передаточные коэффициенты датчика

$$a_{1t} \equiv a_1 \cos(\omega t - \varphi_1), \quad a_{2t} \equiv a_2 \cos(\omega t - \varphi_2), \quad (6)$$

где величины $a_{1,2} = \sqrt{a_{1,2}^{\prime 2} + a_{1,2}^{\prime\prime 2}}$, сдвиги по фазе

$$\varphi_{1,2} = \arctg(a_{1,2}^{\prime\prime} / a_{1,2}^{\prime}), \quad (7)$$

действительные $a_{1,2}^{\prime}$ и мнимые $a_{1,2}^{\prime\prime}$ части передаточных коэффициентов, полученных из решения осесимметричной задачи (рис.1) при комплексной форме записи диэлектрических проницаемостей фаз λ_f (1) датчика.

Найдем функцию плотности вероятностей $f_{\bullet}(\zeta)$ распределения амплитуды напряжения $\tilde{\sigma}_{\bullet}$ по анализу интегральной интенсивности света I на выходе из оптоволоконна датчика и заданной S-образной «функции свечения» - зависимости интенсивности светоотдачи

$$\bar{I} = \bar{I}(\bar{U}) \quad (8)$$

электролюминесцентного элемента от действующего на него напряжения \bar{U} с началом свечения при $\bar{U} = U_{\min}$ и началом насыщенного с интенсивностью \bar{I}_{\max} свечения при $\bar{U} = U_{\max}$ произвольного локального участка (элемента) электролюминесцентного слоя датчика.

Для заданного значения амплитуды $\tilde{U}_{\text{упр}}$ управляющего напряжения (5) и случайных величин $\tilde{\sigma}_{\bullet}$ и, как следствие (4), U_{\bullet} имеем интенсивность света

$$I = \int_0^{\bar{I}_{\max}} P(U_{\bullet} \geq \bar{U}(\bar{I})) d\bar{I} = \int_0^{\bar{I}_{\max}} [1 - P(U_{\bullet} < \bar{U}(\bar{I}))] d\bar{I} = \bar{I}_{\max} - \int_0^{\bar{I}_{\max}} P(\tilde{\sigma}_{\bullet} < \zeta(\bar{I})) d\bar{I}$$

на выходе из оптоволоконна датчика или

$$I = \bar{I}_{\max} - \int_0^{\bar{I}_{\max}} F_{\bullet}(\zeta(\bar{I})) d\bar{I}, \quad (9)$$

где функция распределения

$$F_{\bullet}(\zeta) \equiv P(\tilde{\sigma}_{\bullet} < \zeta), \quad (10)$$

напряжение

$$\zeta(\bar{I}) \equiv (\bar{U}(\bar{I}) - a_{1t} \tilde{U}_{\text{упр}}) / a_{2t}, \quad (11)$$

вероятности P выполнения соответствующих неравенств, условие $U_{\bullet} < \bar{U}(\bar{I})$ эквивалентно $\tilde{\sigma}_{\bullet} < \zeta(\bar{I})$, максимальное значение интенсивности света \bar{I}_{\max} на выходе оптоволокна для случая $U_{\bullet} \rightarrow \infty$ с электролюминесценцией по всей его длине. В фиксированный момент времени t после дифференцирования (9) по амплитуде управляющего напряжения $\tilde{U}_{\text{упр}}$ получим

$$\frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} = - \int_0^{\bar{I}_{\max}} \frac{d}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} F_{\bullet}(\zeta(\bar{I})) d\bar{I} = - \int_0^{\bar{I}_{\max}} \frac{d}{d\zeta} F_{\bullet}(\zeta) \frac{d\zeta}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} d\bar{I}$$

или

$$\frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} = \frac{a_{1t}}{a_{2t}} \int_0^{\bar{I}_{\max}} f_{\bullet}(\zeta(\bar{I})) d\bar{I} \quad (12)$$

с учетом равенств (11),

$$\frac{d}{d\zeta} F_{\bullet}(\zeta) = f_{\bullet}(\zeta), \quad \frac{d\zeta}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} = - \frac{a_{1t}}{a_{2t}},$$

функция плотности вероятностей $f_{\bullet}(\zeta)$ распределения амплитуды напряжения $\tilde{\sigma}_{\bullet}$. Далее, по заданной функции свечения $\bar{I} = \bar{I}(\bar{U})$ (8) найдем производную

$$\frac{d\bar{I}}{d\zeta} = \frac{d\bar{I}}{d\bar{U}} \frac{d\bar{U}}{d\zeta} = a_{2t} \bar{I}'(\bar{U}),$$

в результате имеем

$$d\bar{I} = a_{2t} \bar{I}'(\bar{U}) d\zeta, \quad (13)$$

где

$$\bar{U} = a_{1t} \tilde{U}_{\text{упр}} + a_{2t} \zeta \quad (14)$$

с учетом (11). После подстановки дифференциала (13) в (12)

$$\frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} = a_{1t} \int_{\zeta_{\min}}^{\zeta_{\max}} \bar{I}'(\bar{U}) f_{\bullet}(\zeta) d\zeta$$

получим интегральное уравнение Фредгольма 1-го рода

$$\frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} = a_{1t} \int_{\zeta_{\min}}^{\zeta_{\max}} \bar{I}'(a_{1t}\tilde{U}_{\text{упр}} + a_{2t}\zeta) f_{\bullet}(\zeta) d\zeta, \quad (15)$$

границы области интегрирования

$$\zeta_{\min} = (\bar{U}(0) - a_{1t}\tilde{U}_{\text{упр}}) / a_{2t},$$

$$\zeta_{\max} = (\bar{U}(\bar{I}_{\max}) - a_{1t}\tilde{U}_{\text{упр}}) / a_{2t}.$$

Интегральное уравнение Фредгольма (15) преобразуем к каноническому виду

$$f(x) = \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} K(x-s)y(s)ds, \quad (16)$$

где разностное ядро

$$K(x-s) \equiv \frac{a_{1t}}{a_{2t}} \bar{I}'(\bar{U}) \Big|_{\bar{U}=x-s} = \frac{a_{1t}}{a_{2t}} \bar{I}'(x-s), \quad (17)$$

известная

$$f(x) \equiv \frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} \Big|_{\tilde{U}_{\text{упр}}=x/a_{1t}} \quad (18)$$

и искомая

$$y(s) \equiv f_{\bullet}(\zeta) \Big|_{\zeta=-s/a_{2t}} \quad (19)$$

функции с учетом новых переменных

$$x = a_{1t}\tilde{U}_{\text{упр}}, \quad s = -a_{2t}\zeta, \quad (20)$$

границы интегрирования $s_{\min} = x - \bar{U}(\bar{I}_{\max})$, $s_{\max} = x - \bar{U}(0)$ или

$$s_{\min} \rightarrow -\infty, \quad s_{\max} = x \quad (21)$$

с учетом $\bar{U}(0) = 0$, $\bar{U}(\bar{I}_{\max}) \rightarrow \infty$. Различные аналитические и численные методы решения интегральных уравнений Фредгольма (16) даны в [9-12].

Частные случаи. В случае, когда зависимость $\bar{I} = \bar{I}(\bar{U})$ (8) ступенчатая функция

$$\bar{I} = \begin{cases} 0, & \bar{U} < U_{\min} \\ \bar{I}_{\max}, & \bar{U} \geq U_{\min} \end{cases}$$

тогда производная в ядре уравнения (15) выражается

$$\bar{I}'(\bar{U}) = \bar{I}_{\max} \delta(\bar{U} - U_{\min})$$

через дельта-функцию Дирака и из (14) получим

$$\begin{aligned} \frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} &= a_{1t} \bar{I}_{\max} \int_{\zeta_{\min}}^{\zeta_{\max}} \delta(a_{1t} \tilde{U}_{\text{упр}} + a_{2t} \zeta - U_{\min}) f_{\bullet}(\zeta) d\zeta = \\ &= \frac{a_{1t}}{a_{2t}} \bar{I}_{\max} \int_{\zeta_{\min}}^{\zeta_{\max}} \delta(a_{2t} \zeta - (U_{\min} - a_{1t} \tilde{U}_{\text{упр}})) f_{\bullet}(\zeta) d(a_{2t} \zeta) \end{aligned}$$

или

$$\frac{dI}{d\tilde{U}_{\text{упр}}} = \frac{a_{1t}}{a_{2t}} \bar{I}_{\max} f_{\bullet}(\bar{\zeta}), \quad (22)$$

где $\bar{\zeta} = (U_{\min} - a_{1t} \tilde{U}_{\text{упр}}) / a_{2t}$ с учетом (14), (15); искомая функция плотности вероятностей $f_{\bullet}(\bar{\zeta})$ распределения амплитуды напряжения $\tilde{\sigma}_{\bullet} = \tilde{\sigma}_{\bullet}(z)$ по длине датчика

$$f_{\bullet}(\bar{\zeta}) = \kappa_t \frac{dI_t}{dU_{\text{упр}}}, \quad (23)$$

где константа $\kappa_t = a_{2t} / (a_{1t} I_{\max})$, интенсивность света I_t в момент времени t .

Для случая постоянного управляющего напряжения $U_{\text{упр}} = \text{const}$, тогда в формулах (4)-(23) заменяем величины $\tilde{U}_{\text{упр}}$, a_{1t} на $U_{\text{упр}}$, a_1 соответственно.

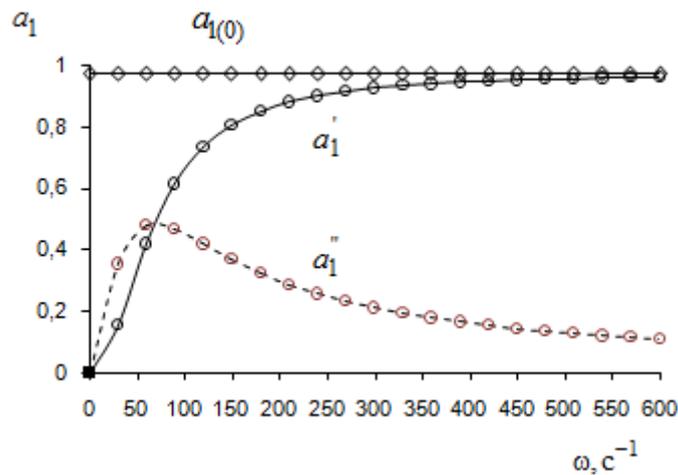
Для случая использования алгоритмов сканирования [2] посредством бегущей вдоль оси z датчика волны управляющего напряжения $U_{\text{упр}} = \tilde{U}_{\text{упр}} e^{i(kz - \omega t)}$ в коэффициенте $a_{1t} \equiv a_1 \cos(\omega t - \varphi_1 - \varphi_z)$ (6) появляется дополнительный сдвиг фазы $\varphi_z = k_z z$, где волновое число $k_z = 2\pi / \lambda = \omega / c$, длина λ и скорость распространения c волны.

3. Численный расчет

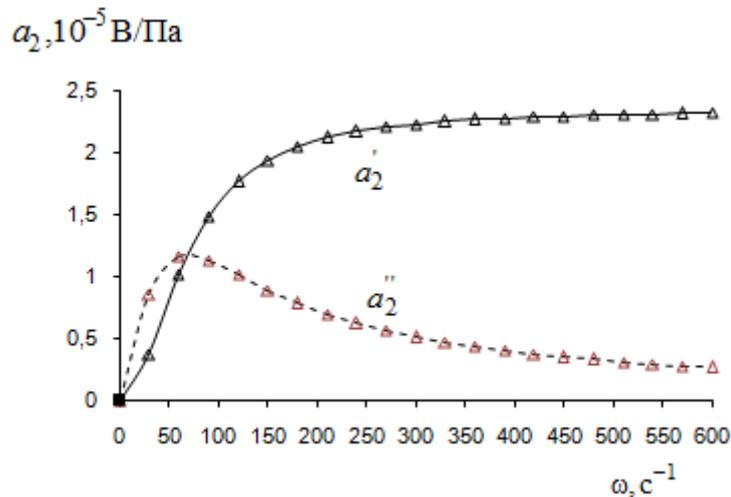
Для проведения численного расчета были приняты следующие значения электроупругих характеристик фаз датчика: изотропные упругие свойства 1-й фазы (оптоволокно) задавались через модуль Юнга $E_{(1)}=50\text{ГПа}$, коэффициент Пуассона $\nu_{(1)}=0.25$, диэлектрическая проницаемость $\lambda_{(1)}=7\lambda_0$, удельная электрическая проводимость $\gamma_{(1)}=10^{-15}\text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ и 2-й фазы (полимерный электролюминесцентный материал) - через $E_{(2)}=0.8\text{ГПа}$, $\nu_{(2)}=0.43$, $\lambda_{(2)}=2.3\lambda_0$, $\gamma_{(2)}=5\cdot 10^{-8}\text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ [13], трансверсально-изотропные свойства 3-й фазы (пьезоэлектрик PVDF с радиальной поляризацией [14, 15]) - через компоненты тензоров упругих свойств $C_{(3)0000}=8.6\text{ГПа}$, $C_{(3)rr00}=C_{(3)rrzz}=5.4\text{ГПа}$, $C_{(3)rrrr}=7.1\text{ГПа}$, $C_{(3)00zz}=5.6\text{ГПа}$, пьезоэлектрических свойств $e_{(3)r00}=-1.1\text{ Кл/м}^2$, $e_{(3)rrr}=2.9\text{ Кл/м}^2$ и диэлектрических проницаемостей $\lambda_{(3)rr}=12.4\lambda_0$, $\lambda_{(3)00}=\lambda_{(3)zz}=14.7\lambda_0$, где диэлектрическая постоянная вакуума $\lambda_0\approx 8.85\cdot 10^{-12}\text{ Ф/м}$; осевая деформация датчика $\varepsilon_{zz}^*=0$. Удельную электрическую проводимость $\gamma_{(3)}$ полимерного пьезоэлектрика PVDF приравняем к проводимости полиэтилена $10^{-10}\text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ [6].

На рис.2 представлены результаты расчета зависимостей действительной и мнимой частей коэффициентов a_1 (рис.2,а), a_2 (рис.2,б) датчика вибродавления от круговой частоты ω при переменном и постоянном значении управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$; значения радиусов концентрических цилиндрических межфазных поверхностей датчика: $r_{(1)}=1\text{мм}$, $r_{(2)}=1.2\text{мм}$, $r_{(3)}=1.4\text{мм}$. На рис.3 представлены результаты расчета зависимостей действительных и мнимых частей передаточных коэффициентов a_1 , a_2 от параметра $q_h=h_2/h_3$ отношения толщин электролюминесцентного h_2 и пьезоэлектрического h_3 слоев датчика при фиксированной суммарной толщине $h_2+h_3=0.4\text{мм}$, $r_{(1)}=1\text{мм}$, $r_{(3)}=1.4\text{мм}$, круговой частоте $\omega=60\text{с}^{-1}$. На рис.4 даны зависимости относительных значений

$\tau_{1,2} \equiv \varphi_{1,2} / (2\pi)$ сдвигов фаз $\varphi_{1,2}$ (7) от круговой частоты ω . На рис.5 даны зависимости интенсивности свечения I локального участка датчика с амплитудой давления $\tilde{\sigma}_\bullet = 10^5 \text{ Па}$ от амплитуды $\tilde{U}_{\text{упр}}$ управляющего электронапряжения для различных отнесенных к периоду T моментов времени t с учетом и без учета ($\gamma = 0$) электропроводимостей элементов датчика; пороговые значения $\tilde{U}_{1,2}$ даны на рис.5 для случая (\square) с учетом γ .

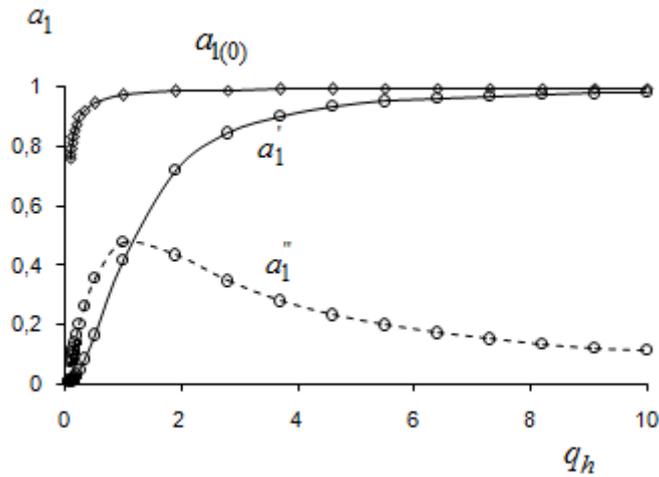


а

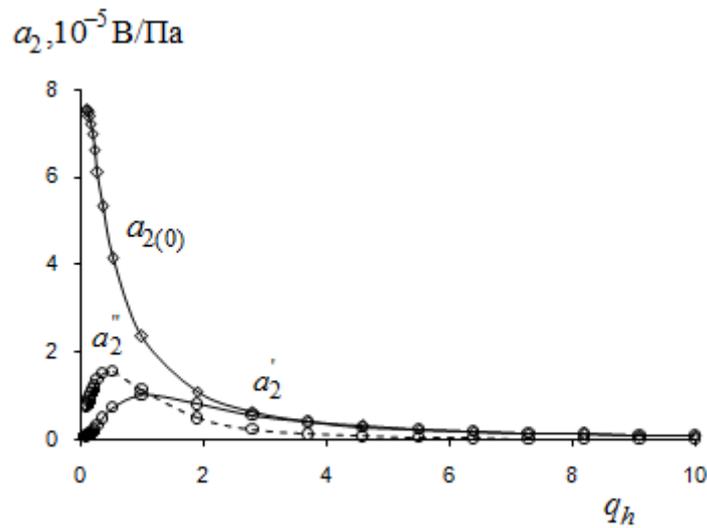


б

Рис.2 Зависимости действительной (сплошная линия) и мнимой (штриховая линия) частей коэффициентов a_1 (\circ, \diamond) (а), a_2 (\triangle) (б) датчика вибродавления от круговой частоты ω при переменном (\circ, \triangle) и постоянном (\diamond) значении управляющего напряжения $U_{\text{упр}}$



а



б

Рис.3 Зависимости действительных (сплошная линия) и мнимых (штриховая линия) частей коэффициентов a_1 (\circ) (а), a_2 (\triangle) (б) датчика вибродавления от коэффициента q_h при круговой частоте $\omega = 60\text{с}^{-1}$, коэффициенты $a_{1(0)}$, $a_{2(0)}$ (\diamond) [2] без учета электропроводимостей ($\gamma = 0$)

3. Выводы

Разработан алгоритм нахождения функции распределения амплитуды стационарного вибродавления $\tilde{\sigma}_\bullet = \tilde{\sigma}_\bullet(z)$ по длине z оптоволоконного пьезоэлектр люминесцентного датчика [1, 2]. по результатам замеряемой на торцевом сечении датчика интенсивности I исходящего из оптоволоконна света

для случая нелинейной «функции свечения» - зависимости интенсивности света от действующего на электролюминесцентный элемент электронапряжения.

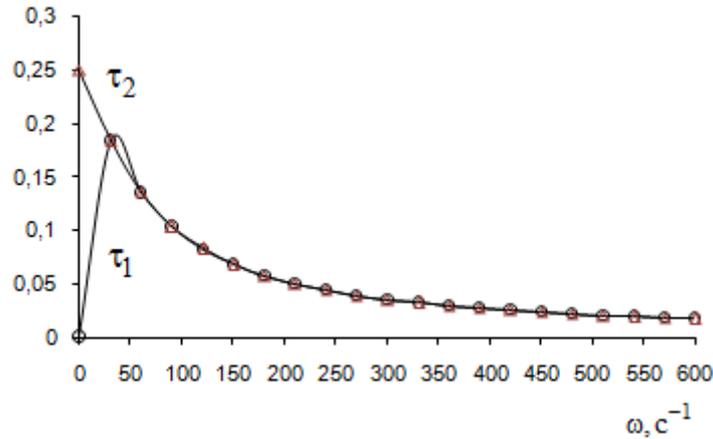


Рис.4 Зависимости относительных значений $\tau_{1,2}$ сдвигов фаз $\varphi_{1,2}$ от круговой частоты ω

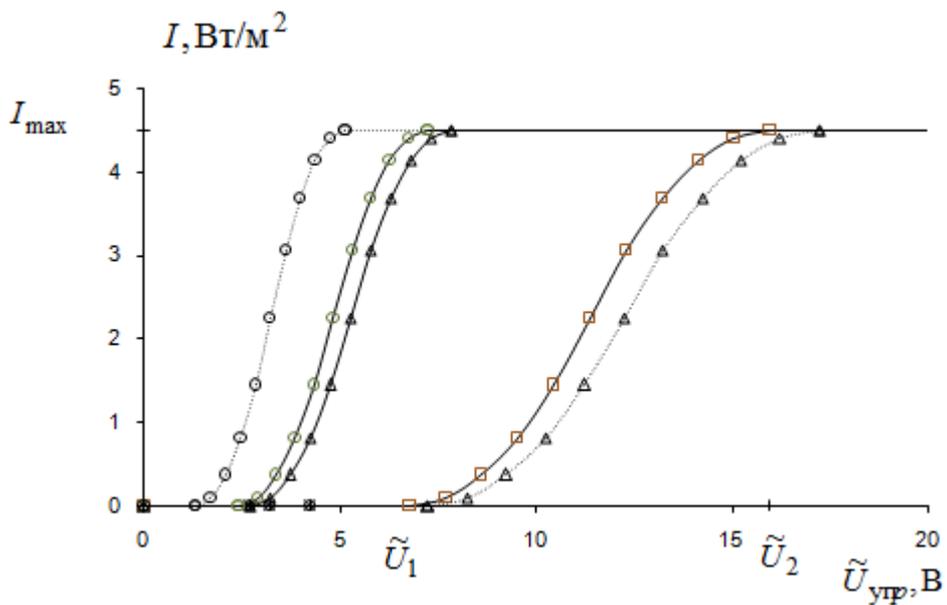


Рис.5 Интенсивности свечения I локального участка с координатой $z = 0$ и амплитудой давления $\tilde{\sigma}_0 = 10^5$ Па для относительных моментов времени $t/T = 0.1$ (\circ), 0.2 (Δ), 0.3 (\square); с учетом (сплошная линия) и без учета (пунктирная линия) электропроводимости γ

Задача сведена к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода (16) с разностным ядром (17), зависящим от управляющего a_1 и информативного a_2 передаточных коэффициентов датчика (2) и от

производной заданной функции свечения электролюминесцентного элемента. Получено аналитическое решение (23) для функции плотности вероятностей $f_{\bullet}(\xi)$ распределения амплитуды вибродавления $\tilde{\sigma}_{\bullet}$ для частного случая, когда ядро выражается через дельта-функцию и интегральное уравнение Фредгольма сводится к алгебраическому. Проведен численный расчет и исследованы частотные зависимости действительных и мнимых частей управляющих a_1 и информативных a_2 передаточных коэффициентов датчика вибродавления с учетом максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей в элементах структуры (рис.2, рис.3). Установлены закономерности изменения функции интенсивности свечения $I = I(\tilde{U}_{упр})$ локального участка электролюминесцентного слоя от амплитуды $\tilde{U}_{упр}$ управляющего электронапряжения датчика под действием вибродавления с амплитудой $\tilde{\sigma}_{\bullet}$ для различных моментов времени с учетом и без учета электропроводимости γ элементов датчика (рис.5, рис.6).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-41-590726.

Литература

1. Патент RU №2630537. Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А., опубл. 11.09.2017; заявка №2016136058 от 06.09.2016 г.
2. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent optical fiber sensor for diagnostics of the stress state and defectoscopy of composites // Mechanics of Composite Materials. –2017. – Vol. 53, No. 2. – P. 229-242.
3. Вандышев Г.К., Зюрюкин Ю.А. Анализ особенностей работы пьезоэлектрического датчика давления на резистивную нагрузку // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т.46, №3. – С.372-376

4. Петров В.М., Бичурин М.И., Srinivasan G. Максвелл-вагнеровская релаксация в магнитоэлектрических композиционных материалах // Письма в ЖТФ.– 2004.–Т.30, №8. – С. 81-87
5. Турик А.В., Чернобабов А.И., Родинин М.Ю. Гетерогенные мультиферроики: магнитоэлектричество и пьезоэффект // Физика твердого тела. – 2009. –Т.51, №8. – С. 1580-1583
6. Турик А.В., Радченко Г.С. Гигантский пьезоэлектрический эффект в слоистых композитах сегнетоэлектрик-полимер // Физика твердого тела.– 2003.– Т.45, №9. – С. 1676-1679
7. Паньков А.А. Максвелл-вагнеровская релаксация в пьезокомпозите PVF/феррит с эллипсоидальными включениями в переменном электрическом поле // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал.– 2013. –№6 . URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jun13/12/text.pdf>
8. Паньков А.А. Диэлектрическая релаксация в волокнистом композите полиэтилен/феррит // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал.– 2014. – №2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb14/1/text.pdf>
9. Михлин С.Г., Смолицкий Х.И. Приближенные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1965. — 384 с.
10. Васильева А.Б., Тихонов А.Н. Интегральные уравнения. – 2-е, стереотип. изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 360 с.
11. Полянин А. Д., Манжиров А. В. Справочник по интегральным уравнениям. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 608 с.
12. Латыпов А.Ф. Численные методы решения линейных интегральных уравнений Фредгольма и Вольтерра 1-го рода // Международная конференция «Обратные и некорректные задачи математической физики», посвященная 75-летию академика М.М.Лаврентьева, 20-25 августа 2007 г., Новосибирск, Россия

13. Электрические характеристики тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / А. И. Гусев, М. К. Самохвалов; под науч. ред. М. К. Самохвалова. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 125 с.
14. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
15. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride // J. Acoust. Soc. Amer. – 1981. – Vol. 70, № 6. – P. 1596-1608

Ссылка на статью:

А. А. Паньков. Максвелл-Вагнеровская релаксация электрических полей в пьезоэлектролюминесцентном оптоволоконном датчике вибродавления. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/6/text.pdf>