

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.3>

УДК 537.8

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ДЕМПФИРОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ ОПТОВОЛОКОННЫМ PEL-ДАТЧИКОМ С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ УПРАВЛЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

А. А. Паньков

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

Статья поступила в редакцию 29 сентября 2020 г.

Аннотация. Разработана математическая динамическая модель функционирования оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного (PEL) датчика вибродавления в режиме демпфирования с учетом электрических проводимостей и максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей фаз для случая действия гармонического напряжения (вибродавления) на внешней цилиндрической поверхности датчика. Получено и исследовано аналитическое решение задачи демпфирования стационарных осесимметричных колебаний оптоволоконного PEL-датчика посредством приложения к электродам датчика управляющего электрического напряжения, когерентного и со сдвигом фаз по отношению к вибродавлению. Установлены и изучены закономерности частотных зависимостей для действительных, мнимых частей управляющих, информативных передаточных и демпфирующих коэффициентов датчика. Проведен анализ влияния величины и угла сдвига фаз управляющего электрического напряжения на результаты численного моделирования интенсивности светового потока на выходе из оптоволоконна датчика под действием вибродавления. Найдены частотные зависимости для электрического импеданса (полного сопротивления) электрической цепи переменного тока датчика в сравнении с аппроксимацией этих зависимостей по электромеханической аналогии. Выявлено, что в рассматриваемом частотном диапазоне электрический импеданс датчика с удовлетворительной точностью

находится из рассмотрения эквивалентного электрического контура с параллельным соединением частотно зависимых активного и емкостного элементов. Установлен частотный диапазон и значения управляющих параметров для эффективного активного демпфирования вибродавления через преобразование в джоулево тепло (рассеивание) подводимой к датчику механической энергии. Сравнение тестовых результатов моделирования аналитического и численного (в пакете ANSYS) подходов подтверждают достоверность и адекватность полученных решений.

Ключевые слова: пьезоэластичность, оптоволоконный датчик давления, демпфирование вибраций, максвелл-вагнеровская релаксация, численное моделирование.

Abstract. A mathematical dynamic model of the operation of the vibration pressure optical fiber piezoelectroluminescent (PEL) sensor in the damping mode was developed taking into account the electrical conductivities and Maxwell-Wagnerian relaxation of electric fields in the phases for the case of harmonic stress (vibration pressure) on the external cylindrical surface of the sensor. Analytical solution of damping of stationary axisymmetric oscillations of optical fiber PEL-sensor is obtained and investigated by applying coherent control electric voltage to electrodes of sensor with phase shifting relative to vibration pressure. Regularities of frequency dependencies for real, imaginary parts of control, informative transfer and damping coefficients of sensor are established and studied. Analysis of influence of value and shift angle of phases of control electric voltage on results of numerical simulation for intensity of light flux at output from optical fiber of sensor under action of vibration pressure is performed. Frequency dependencies were found for the electrical impedance of the AC electric circuit of the sensor in comparison with the approximation of these dependencies by electromechanical analogy. It was revealed that in the frequency range under consideration, the electrical impedance of the sensor with satisfactory accuracy is based on consideration of an equivalent electric circuit with parallel connection of frequency-dependent active and capacitive elements. Frequency range and values of control parameters are set for effective

active damping of vibration pressure through conversion to Joule heat (dissipation) of mechanical energy supplied to the sensor. The results of comparing the analytical and numerical (in the ANSYS package) approaches confirm the validity and adequacy of the decisions obtained.

Key words: piezoelectroelasticity, fiber-optic pressure sensor, vibration damping, Maxwell-Wagner relaxation, numerical simulation.

Введение

Вибрация элементов конструкций нежелательна для многих физико-механических, акустических процессов и может быть подавлена при помощи демпфирующих пьезоэлектрических элементов, функционирующих в режиме активного демпфирования (актюатора) с противодействием вибрациям через дополнительные источники энергии, средства контроля (датчики) и обратной связи (см. [1, 2]) или в режиме пассивного демпфирования по аналогии, например, с вязкоупругими полимерами, которые рассеивают механическую энергию вибрации посредством преобразования ее в тепло (см. [3]). Для повышения диссипативных характеристик пьезоэлементов, функционирующих в режиме пассивного демпфирования, используют их шунтирование, в результате чего механическая энергия вибраций преобразуется в электрическую (прямой пьезоэффект) и далее через шунтирование - в тепло (см. [4-6]). Шунтирование пьезоэлементов, в частности, пьезоэлектрических частиц (включений) может быть осуществлено посредством использования электропроводного связующего (матрицы) или внешней электрической цепи с активным сопротивлением. Шунтирование пьезоэлектрических частиц в композите осуществлено в [4, 5] добавлением электрически проводящих частиц, например, железа (см. [4]), углеродных нанотрубок (см. [5]) в матрицу композита. Экспериментальные исследования демпфирующих свойств композита с пьезоэлектрическими включениями даны в [7] и эпоксидной смолы с пьезоэлектрическими и углеродными частицами в [8]. Для активного демпфирования вибраций конструкций в [9] разработаны математические

модели и методы управления колебаниями конструкции (балки) посредством одного (как закрепленного, так и перемещающегося по поверхности балки) или нескольких (в виде системы) размещенных на ее поверхности точечных актюаторов, при этом процесс демпфирования колебаний может осуществляться в режиме, когда на разных временных промежутках процесса подключаются разные комбинации актюаторов. В [10] представлены результаты оптимизации системы гашения вибраций композитной лопасти вертолета посредством простых и биморфных пьезоэлектрических актюаторов, выявлены их оптимальные размеры и места расположения на поверхности лопасти для подавления конкретной моды изгибных колебаний как в активном, так и в пассивном режимах. В [11] разработана математическая модель и даны результаты численного моделирования диссипативных характеристик реального пьезоэлектрического волоконного актюатора (MFC) при пассивном режиме демпфирования с использованием метода конечных элементов в сравнении с результатами экспериментальных исследований. С использованием подхода электромеханической аналогии в [12-15] разработаны математические модели систем активного демпфирования вибраций и на их основе выявлены и изучены оптимальные режимы активного демпфирования вибраций конструкции в виде пластины или оболочки посредством закрепленного на ее внешней поверхности пьезоэлектрического актюатора при наличии у него настраиваемой на оптимальный режим внешней электрической цепи в требуемом частотном диапазоне.

Цель – установление и изучение закономерностей частотных зависимостей управляющих, информативных и демпфирующих коэффициентов оптоволоконного PЕL-датчика вибродавления (см. [16, 17]) на основе построения математической модели стационарных осесимметричных колебаний датчика с учетом электрической проводимости фаз и максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей (см. [18]), что необходимо для уточненного мониторинга в режиме «диагностика» неоднородных вибрационных термо-силовых полей и для расширения функциональных

возможностей датчиков на режим «демпфирование» с пассивным и/или активным гашением вибраций.

1. Математическая модель функционирования датчика

Датчик (рис.1) (см. [16]) представляет собой оптоволоконно 1 с коаксиальными электролюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 слоями (оболочками); оптоволоконно и электролюминесцентный слой разделены внутренним светопрозрачным (или перфорированным) управляющим электродом 4, на поверхности пьезоэлектрического слоя расположен внешний управляющий электрод 5, при этом пьезоэлектрический слой имеет радиальную поляризацию.

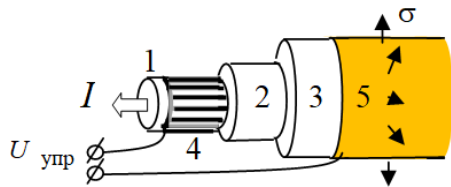


Рис.1. Оптоволоконный PEL-датчик давления.

Информативные световые сигналы возникают на локальных участках электролюминесцентного слоя под действием на него электрического напряжения

$$U_{\text{люм}} = a_1 U_{\text{упр}} + a_2 \sigma, \quad (1)$$

величина которого складывается из двух составляющих: «управляющей», зависящей от величины управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}}$ на электродах датчика, и «информативной», обусловленной прямым пьезоэффектом пьезоэлектрического слоя датчика под действием внешней диагностируемой (демпфируемой) нагрузки σ ; таким образом, в датчике «механолюминесцентный эффект» обусловлен взаимодействием пьезоэлектрического 3 и электролюминесцентного 2 слоев. Далее, световые сигналы проникают через светопрозрачный электрод 4 во внутрь оптоволоконна 1 и передаются по оптоволокону к приемнику-анализатору, где (в режиме «диагностика») происходит обработка (см. [17]) интенсивности интегрального светового потока I на выходе из оптоволоконна 1 при вариациях электрическим

напряжением $U_{упр}$ на управляющих электродах 4, 5 и по результатам обработки находится искомое распределение величины напряжения σ по длине датчика. В режиме «демпфирование» с пассивным и/или активным гашением вибраций параметры (частоту, сдвиг фаз) управляющего электрического напряжения $U_{упр}$ задаем из условия наибольшего значения тангенса угла механических потерь датчика $tg\delta_{\omega\sigma}$ под действием заданной гармонической нагрузки σ .

Рассматриваем стационарные гармонические осесимметричные колебания датчика (рис.1) для случая когерентных электромеханических возмущений, когда диагностируемое (или демпфируемое) механическое напряжение $\sigma = \tilde{\sigma}e^{i\omega t}$ на внешней цилиндрической поверхности датчика и управляющее электрическое напряжение

$$U_{упр} = \tilde{U}_{упр}e^{i\omega t} = \bar{U}_{упр}e^{i(\omega t + \Delta_{U\sigma})}$$

на протяженных по всей длине датчика тонких «внутреннем» и «внешнем» коаксиальных цилиндрических электродах пропорциональны экспоненте $e^{i\omega t}$ и имеют некоторый угол сдвига фаз $\Delta_{U\sigma}$, где абсолютные значения $\bar{U}_{упр}$, $\bar{\sigma} \equiv \tilde{\sigma}$, круговая частота ω , время t .

Учет электрических проводимостей фаз датчика осуществим через комплексную форму записи диэлектрических проницаемостей фаз (см. [19, 20])

$$\lambda_f = \lambda'_f - i\gamma_f / \omega, \tag{2}$$

где действительные части диэлектрических проницаемостей λ'_f , удельные электрические проводимостями γ_f фаз: оптоволокна, электролюминофора и пьезоэлектрика ($f = \overline{1,3}$). В результате имеем, во-первых, комплексные значения и зависимости электроупругих полей внутри объема и результирующих характеристик датчика от частоты ω , в частности, передаточные управляющий a_1 и информативный a_2 коэффициенты датчика примут вид

$$a_{1,2} = a'_{1,2} + ia''_{1,2} \tag{3}$$

с действительными $a_{1,2}'$ и мнимыми $a_{1,2}''$ частями, входящими в разложение величины электрического напряжения $U_{\text{люм}}$ (1) и комплексной величины его амплитуды

$$\tilde{U}_{\text{люм}} = a_1 \tilde{U}_{\text{упр}} + a_2 \tilde{\sigma} \quad (4)$$

на электролюминесцентном слое датчика, и, во-вторых, к возникновению у датчика дисперсии и энергетических потерь, известных под названием «максвелл-вагнеровская релаксация» (см. [19, 20]).

При гомогенизации и переходе на «макроуровень» двухслойной области электролюминофор/пьезоэлектрик, расположенной между коаксиальными цилиндрическими электродами и состоящей из последовательно соединенных электролюминесцентного и пьезоэлектрического коаксиальных цилиндрических слоев, имеем значения амплитуды для радиальной «макроиндукции» к поверхности электродов

$$\tilde{D}_r^* = a_{D1} \tilde{U}_{\text{упр}} + a_{D2} \tilde{\sigma} = \alpha_D \tilde{U}_{\text{упр}} \quad (5)$$

с учетом обозначений коэффициентов

$$\alpha_D = a_{D1} + \kappa a_{D2}, \quad \kappa \equiv \tilde{\sigma} / \tilde{U}_{\text{упр}}. \quad (6)$$

Для гомогенизированной двухслойной области электролюминофор/пьезоэлектрик имеем комплексные значения (по аналогии с видом (2)) эффективной «полной» диэлектрической радиальной проницаемости

$$\lambda_{rr}^* = \lambda_{rr}^{*'} - i \gamma_{rr}^* / \omega \quad (7)$$

с действительным значением проницаемости $\lambda_{rr}^{*'}$ и проводимостью γ_{rr}^* , которая рассчитывается

$$\lambda_{rr}^* = \alpha_D (r_{(3)} - r_{(1)}) \quad (8)$$

по значениям коэффициента α_D (6) с учетом равенств

$$\tilde{D}_r^* = \lambda_{rr}^* \tilde{E}_r^*, \quad \tilde{E}_r^* = \tilde{U}_{\text{упр}} / (r_{(3)} - r_{(1)}), \quad U_{\text{упр}} = \Phi_{(1)} - \Phi_{(3)}, \quad (9)$$

где амплитуда «макронапряженности» электрического поля \tilde{E}_r^* между поверхностями коаксиальных электродов с радиусами $r_{(1)}$, $r_{(3)}$, электрический потенциал на внутреннем электроде $\varphi_{(1)} = \tilde{\varphi}_{(1)} e^{i\omega t}$, при этом имеем $\tilde{\varphi}_{(1)} = \tilde{U}_{\text{упр}}$ с учетом принятого равенства $\varphi_{(3)} = 0$ для электрического потенциала на внешнем электроде. Линейная плотность (на единицу длины датчика) электрического заряда на внутреннем и внешнем электродах датчика

$$q = 2\pi r_{(3)} \hat{D}_r^*, \quad (10)$$

где радиус внешнего электрода (датчика) $r_{(3)}$, сила тока внутри датчика между электродами

$$I = \frac{dq}{dt} = 2\pi r_{(3)} \frac{d\hat{D}_r^*}{dt} = 2\pi r_{(3)} \tilde{D}_r^* \frac{d}{dt} e^{i\omega t} = 2i\pi\omega r_{(3)} \hat{D}_r^* \quad (11)$$

или в виде $I = \tilde{I} e^{i\omega t}$ с амплитудой

$$\tilde{I} = 2i\pi\omega r_{(3)} \alpha_D \tilde{U}_{\text{упр}} \quad (12)$$

и учетом (5), (6), (8)-(11).

Комплексные величины полного сопротивления (электрический импеданс) \tilde{z} и полной проводимости (адмиттанс) \tilde{g}

$$\tilde{z} \equiv \frac{\tilde{U}_{\text{упр}}}{\tilde{I}} = Z e^{i\delta_{\text{IU}}}, \quad \tilde{g} \equiv 1/\tilde{z} = G e^{-i\delta_{\text{IU}}} \quad (13)$$

где сдвиг фазы δ_{IU} между силой тока и управляющим электрическим напряжением на электродах, полное сопротивление $Z = \bar{U}_{\text{упр}} / \bar{I}$ и проводимость $G = 1/Z$ в радиальном направлении для двухслойной области электролюминофор/пьезоэлектрик между цилиндрическими электродами на единицу длины датчика, которые рассчитываем на основе разложения величины

$$J \equiv 2i\pi\omega r_{(3)} \alpha_D = Z^{-1} e^{-i\delta_{\text{IU}}} \quad (14)$$

с учетом равенств (12), (13), где абсолютные значения $\bar{U}_{\text{упр}}$, \bar{I} . Известны решения (см. [21]) для полного сопротивления $Z_{1,2}$ и тангенса угла сдвига фаз $\text{tg}\delta_{1,2}$ силы тока и напряжения $U_{\text{упр}}$ электрической цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление R и электрическую емкость C на единицу длины датчика, при их параллельном

$$Z_1 = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \text{tg}\delta_1 = \omega RC \quad (15)$$

и последовательном

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + (\omega C)^{-2}}, \quad \text{tg}\delta_2 = 1/(\omega RC) \quad (16)$$

соединениях, где величины $R = R(\omega)$ и $C = C(\omega)$ рассчитываем

$$R = \frac{\ln \frac{r(3)}{r(1)}}{2\pi\gamma_{rr}^*}, \quad C = \frac{2\pi\lambda_{rr}^*}{\ln \frac{r(3)}{r(1)}}, \quad (17)$$

по значениям диэлектрической проницаемости $\lambda_{rr}^* = \lambda_{rr}^*(\omega)$ и проводимости $\gamma_{rr}^* = \gamma_{rr}^*(\omega)$ между электродами датчика (7).

На единице длины датчика за период T радиальные усилия $F = 2\pi r_{(3)}\sigma$ на внешней цилиндрической поверхности датчика совершают работу

$$A_\sigma = \int_0^T F' du' = 2\pi r_{(3)} \bar{\sigma} \bar{u} \int_0^T \cos(\omega t) d \cos(\omega t - \delta_{\text{у}\sigma}) = 2\pi^2 r_{(3)} \bar{\sigma} \bar{u} \sin \delta_{\text{у}\sigma}, \quad (18)$$

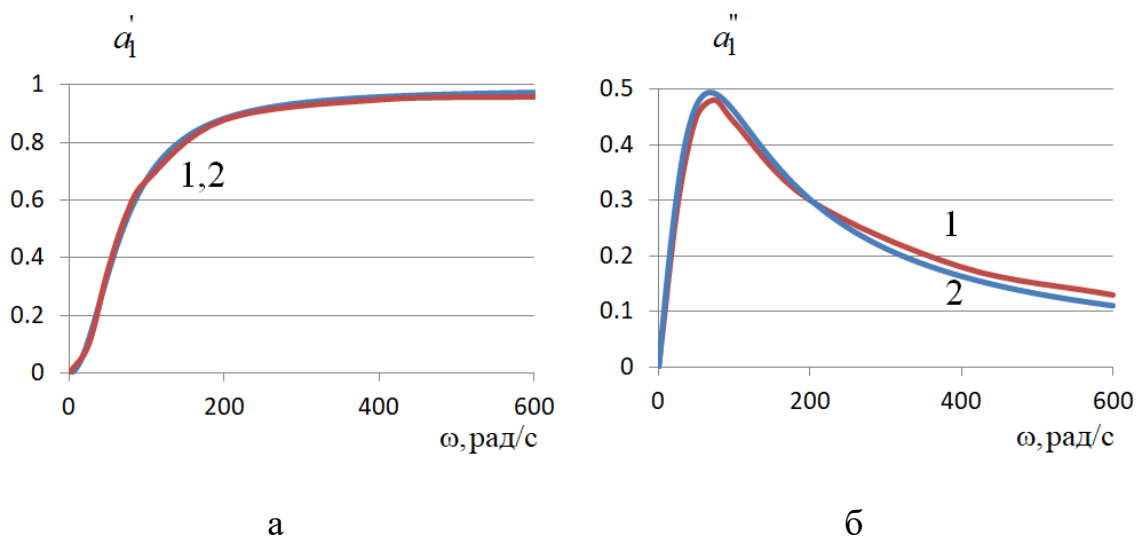
переходящую в тепловую рассеиваемую датчиком энергию, где действительные части усилия F' и перемещения u' , абсолютные значения напряжения $\bar{\sigma}$ и перемещения \bar{u} . «Коэффициент рассеивания» датчиком подводимой извне упругой энергии запишем в виде

$$A_\sigma / A_{\sigma 0} = 2\pi \frac{S}{S_0} \sin \delta_{\text{у}\sigma} \quad (19)$$

с учетом (18), где использованы обозначения величин $A_{\sigma 0}$, F_0 , u_0 , S_0 для случая квазистатического механического нагружения и отсутствия электрической проводимости фаз датчика: работы $A_{\sigma 0} = \frac{1}{2} F_0 u_0 = \pi r_{(3)} S_0 \bar{\sigma}^2$, силы $F_0 = 2 \pi r_{(3)} \bar{\sigma}$, перемещения $u_0 = S_0 \bar{\sigma}$ и соответствующего коэффициента податливости S_0 датчика.

2. Результаты численного моделирования

Численные значения характеристик электрических и упругих свойств фаз, радиусов концентрических цилиндрических межфазных поверхностей датчика даны в [22]. Для случая нулевого угла сдвига фаз $\Delta_{U\sigma} = 0$ управляющего электрического напряжения $U_{упр}$ на рис.2 представлены результаты численного моделирования частотных зависимостей действительных $a'_{1,2}$ и мнимых $a''_{1,2}$ частей управляющего a_1 и информативного a_2 передаточных коэффициентов (3), (4) оптоволоконного PEL-датчика (см. рис.1), полученные с использованием аналитического решения (см. [23]) (красная линия 1), в сравнении с численным решением объемной связанной краевой задачи электроупругости для фрагмента области датчика (см. рис.1) в программном пакете для конечно-элементного анализа ANSYS (синяя линия 2). Результаты сравнения аналитического и численного подходов подтверждают достоверность и адекватность полученных решений.



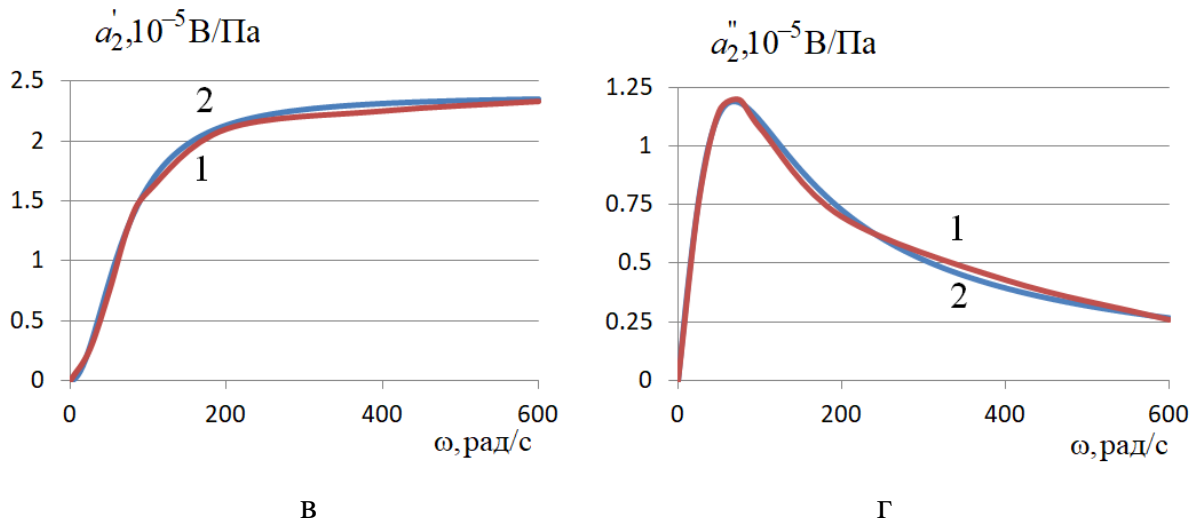


Рис.2. Зависимости действительных $a'_{1,2}$ и мнимых $a''_{1,2}$ частей управляющего a_1 и информативного a_2 передаточных коэффициентов от частоты ω .

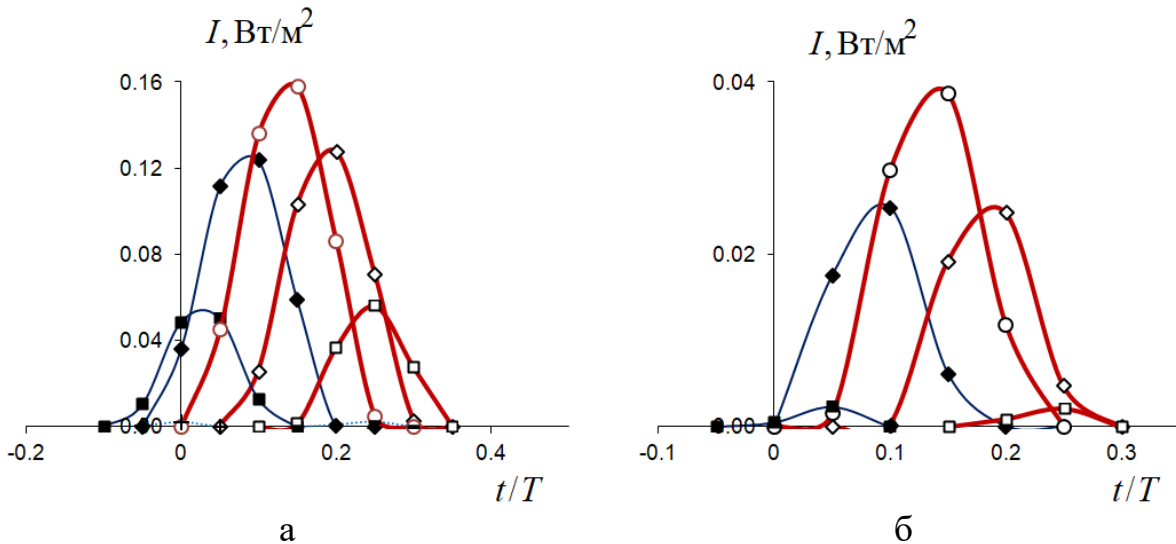


Рис.3. Интенсивности свечения I на выходе из оптоволокна в зависимости от времени t для различных значений $\Delta \bar{U}_{упр} = 1\text{В}$ (а), 2В (б) при сдвиге фаз $\Delta U_{\sigma} = 0$ (\circ), $\Delta U_{\sigma} = \pm\pi/6$ (\blacklozenge, \diamond), $\pm\pi/3$ (\blacksquare, \square).

Результаты численного моделирования интенсивностей свечения I на выходе из оптоволокна в зависимости от времени t на рис.3 получены для случая, когда участок длиной $l_1 = 0.1\text{м}$ с координатами границ $z \in (0.1; 0.2)\text{м}$ однородно нагружен гармоническим механическим напряжением σ с амплитудой $\bar{\sigma} = 100\text{кПа}$ с круговой частотой $\omega = 60\text{рад/с}$, при этом значения действительных $a'_{1,2}$ и мнимых $a''_{1,2}$ частей передаточных коэффициентов $a_{1,2}$:

$$a'_1 = 0.420, a''_1 = 0.479, a'_2 = 10.125\text{мкВ/Па}, a''_2 = 11.591\text{мкВ/Па} \quad (3), \text{ (см. рис.2).}$$

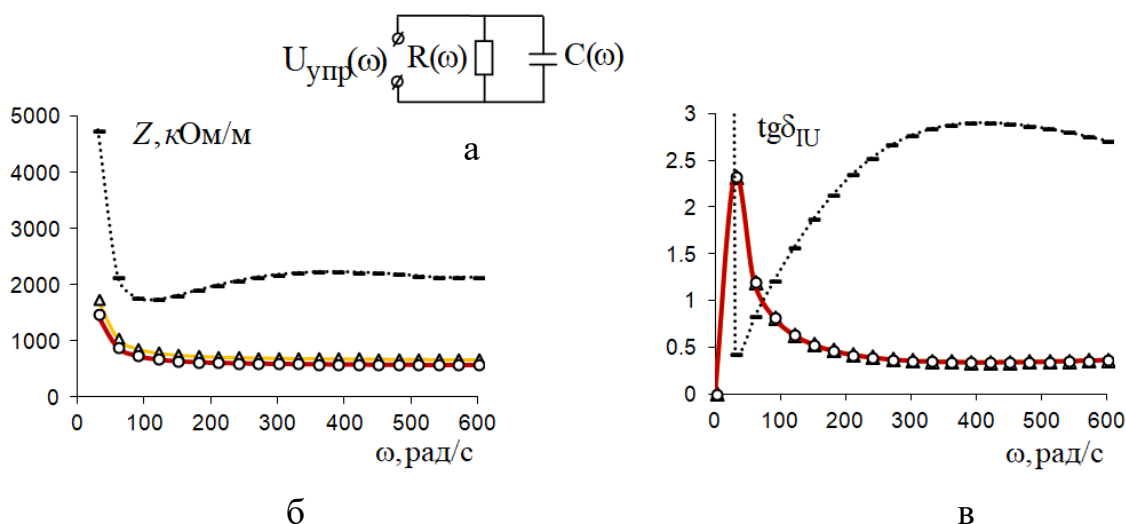


Рис.4. Полное сопротивление Z (б) и тангенс угла сдвига фаз $tg\delta_{IU}$ (в) в зависимости от круговой частоты ω при амплитудах $\bar{\sigma} = 100$ кПа, $\bar{U}_{упр} = 100$ В и сдвиге фаз $\Delta U_{\sigma} = 0$ в сравнении с приближением по электромеханической аналогии (а).

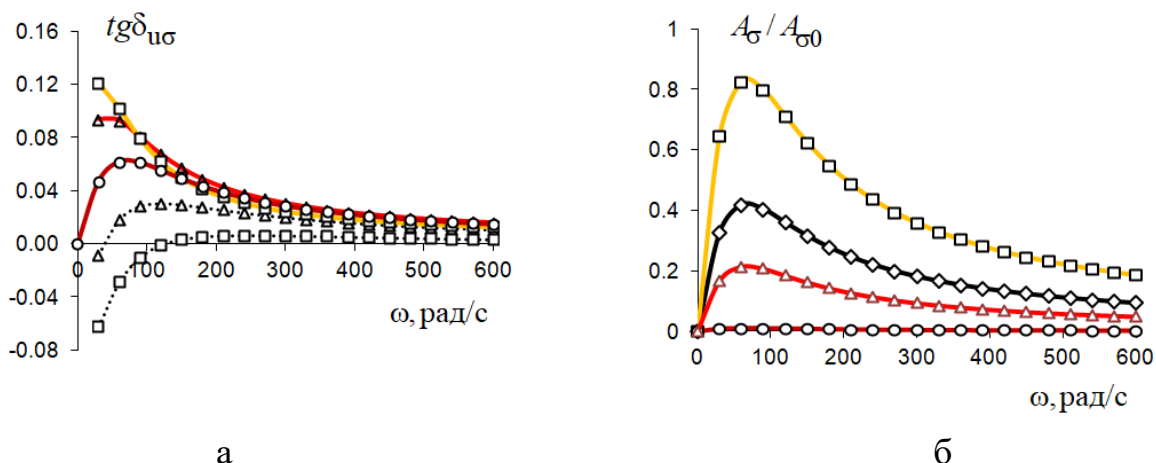


Рис.5. Тангенс угла механических потерь $tg\delta_{у\sigma}$ датчика для случая $\bar{U}_{упр} = 100$ В, $\Delta U_{\sigma} = 0$ (\circ), $\pm\pi/6$ (\triangle), $\pm\pi/3$ (\square) (сплошная линия для случая $\Delta U_{\sigma} \geq 0$, пунктирная линия для случая $\Delta U_{\sigma} < 0$) (а) и рассеиваемой механической энергии $A_{\sigma}/A_{\sigma 0}$ датчика для случая $\Delta U_{\sigma} = 0$, $\bar{U}_{упр} = 0$ В (\circ), 50 (\triangle), 100 (\diamond), 200 (\square) (б) в зависимости от круговой частоты ω при $\bar{\sigma} = 100$ кПа.

Амплитуда управляющего электрического напряжения $\bar{U}_{упр} = \bar{U}_{0\text{упр}} + \Delta\bar{U}_{упр}$ рассчитывалась через пороговое значение амплитуды для начала/прекращения свечения на выходе из оптоволокна $\bar{U}_{0\text{упр}} = 2.294$ В для случая $\Delta U_{\sigma} = 0$ или через

значения 2.461В, 2.459В - для случаев $\Delta_{U\sigma} = \pm\pi/6$ или через значения 3.014В, 3.010В - для случаев $\Delta_{U\sigma} = \pm\pi/3$ соответственно, период колебаний $T = 2\pi/\omega$, скорость распространения светового потока по оптоволокну c . Для электролюминесцентной оболочки использована считающаяся известной, например, модельная «S-образная» кривая (см. [22]) зависимости интенсивности свечения на выходе из оптоволокну от приложенного к боковым поверхностям оболочки постоянного электрического напряжения с характерными пороговыми значениями: U_{\min} для начала свечения и U_{\max} для начала насыщенного свечения на выходе из оптоволокну с интенсивностью $I_{\max} = 4.5 \text{ Вт/м}^2$ при однородной электролюминесценции оболочки по всей длине датчика. Для случая заданных начальных параметров: амплитуд $\bar{\sigma} = 100 \text{ кПа}$, $\bar{U}_{\text{упр}} = 100 \text{ В}$, сдвига фаз $\Delta_{U\sigma} = 0$ на рис.4 представлены результаты расчета полного сопротивления Z (○) (см. рис.4,б) и тангенса угла сдвига фаз $\text{tg}\delta_{\text{IU}}$ (○) (см. рис.4,в) электрической цепи переменного тока в датчике (13), (14) в сравнении с приближенными решениями для параллельного Z_1 , $\text{tg}\delta_1$ (△) (15) (см. рис.4,а) и последовательного Z_2 , $\text{tg}\delta_2$ (=) (16) соединений частотно зависимых элементов: активного сопротивления $R(\omega)$ и электрической емкости $C(\omega)$ (17) в зависимости от круговой частоты ω . На рис.5 представлены результаты расчета тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta_{\text{u}\sigma}$ для случая $\bar{U}_{\text{упр}} = 100 \text{ В}$ с вариацией значения $\Delta_{U\sigma}$ при $\bar{\sigma} = 100 \text{ кПа}$ (см. рис.5,а) и коэффициента рассеиваемой механической энергии $A_{\sigma}/A_{\sigma 0}$ датчика (19) для случая $\Delta_{U\sigma} = 0$ с вариацией значения $\bar{U}_{\text{упр}}$ с учетом численного значения $S_0 = 0.1064 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{Н}$ (см. рис.5,б).

Заключение

Разработана математическая динамическая модель функционирования оптоволоконного PEL-датчика вибродавления (см. рис.1) в режиме демпфирования с учетом электрических проводимостей фаз и максвелл-вагнеровской релаксации в фазах электрических полей для случая действия

гармонического напряжения σ (вибродавления) на внешней цилиндрической поверхности датчика. Получено и исследовано аналитическое решение задачи демпфирования стационарных осесимметричных колебаний оптоволоконного PEEL-датчика посредством приложения к электродам датчика когерентного со сдвигом фаз $\Delta_{U\sigma}$ (относительно вибродавления) управляющего электрического напряжения $U_{упр}$. Установлены и изучены закономерности частотных зависимостей для действительных, мнимых частей управляющих и информативных передаточных $a_{1,2}(\omega)$ (см. рис.2) и демпфирующих (см. рис.5,а) коэффициентов датчика. Проведен анализ влияния величины и угла сдвига фаз $\Delta_{U\sigma}$ управляющего электрического напряжения на результаты численного моделирования (см. рис.3) для интенсивности светового потока на выходе из оптоволоконна датчика под действием вибродавления. Найдены частотные зависимости для электрического импеданса (полного сопротивления) электрической цепи переменного тока датчика (см. рис.4) в сравнении с аппроксимацией этих зависимостей по электромеханической аналогии. Выявлено, что в рассматриваемом частотном диапазоне $\omega \in (0; 600)$ рад/с электрический импеданс датчика с удовлетворительной точностью находится из рассмотрения эквивалентного электрического контура с параллельным соединением частотно зависимых активного $R(\omega)$ и емкостного $C(\omega)$ элементов (см. рис.4). Установлен частотный диапазон и значения управляющих параметров для эффективного активного демпфирования вибродавления (см. рис.5,б) через преобразование в джоулево тепло и «рассеивание» подводимой к датчику механической энергии. Результаты сравнения аналитического и численного (в пакете ANSYS) подходов (см. рис.2) подтверждают достоверность и адекватность полученных решений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-41-590010.

Литература

1. Ajit A., Ang K. K., Wang C. M. Shape control of statically indeterminate laminated beams with piezoelectric actuators // *Mechanics of advanced materials and structures*. 2003. Vol. 10. № 2. P. 145-160.
2. Kayacik O., Bruch Jr. J.C., Sloss J.M., Adali S., Sadek I.S. Piezo control of free vibrations of damped beams with time delay in the sensor feedback // *Mechanics of advanced materials and structures*. 2009. Vol. 16. № 5. P. 345-355.
3. Chung D.D.L. Materials for vibration damping: Review // *Journal of materials science*. 2001. Vol. 36. P. 5733-5737.
4. Sharma S.K., Gaur H., Kulkarni M., Patil G., Bhattacharya B., Sharma A. PZT–PDMS composite for active damping of vibrations // *Composites science and technology*. 2013. Vol. 77. P. 42-51.
5. Aldraihem O.J., Baz A., Al-Saud T.S. Hybrid composites with shunted piezoelectric particles for vibration damping // *Mechanics of advanced materials and structures*. 2007. Vol. 14. № 6. P. 413-426.
6. Hagood N.W., von Flotow A. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks // *Journal of sound and vibration*. 1991. Vol. 146. P. 243-268.
7. Asmatulu R., Claus R.O., Mecham J.B., Inman D.J. Improving the damping properties of composites using ferroelectric inclusions // *Journal of intelligent material systems and structures*. 2005. Vol. 16. P. 463-468.
8. Hori M., Aoki T., Ohira Y., Yano S. New type of mechanical damping composites composed of piezoelectric ceramics, carbon black and epoxy resin // *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 2001. Vol. 32. P. 287-290.
9. Атамуратов А.Ж., Михайлов И.Е., Таран Н.А. Гашение вынужденных поперечных колебаний упругой балки с помощью нескольких стационарных актюаторов // *Вестник Пермского национального*

- исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 2. С. 5-15.
10. Шевцов С.Н., Акопьян В.А., Панич А.А., Паринов И.А., Самощенко И.Г. Оптимизация системы пьезоактюаторного гашения вибраций композитной лопасти вертолета // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 2-8.
11. Yang Kuang, Meiling Zhu Evaluation and validation of equivalent properties of macro fibre composites for piezoelectric transducer modelling // Composites Part B: Engineering. 2019. Vol. 158. P. 189-197.
12. Kligman E.P., Matveenko V.P. Natural Vibration Problem of Viscoelastic Solids as Applied to Optimization of Dissipative Properties of Constructions // Int. J. Vibration and Control. 1997. Vol. 3. № 1. P. 87-102.
13. Матвеенко В.П., Клигман Е.П., Юрлов М.А., Юрлова Н.А. Моделирование и оптимизация динамических характеристик smart-структур с пьезоматериалами // Физическая мезомеханика. 2012. Т. 15. № 1. С. 75-85.
14. Матвеенко В.П., Ошмарин Д.А., Севодина Н.В., Юрлова Н.А. Задача о собственных колебаниях электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями и конечно-элементные соотношения для ее численной реализации // Вычислительная механика сплошных сред. 2016. № 4. С. 476-485.
15. Юрлов М.А., Ошмарин Д.А., Севодина Н.В., Юрлова Н.А. Решение задачи о собственных колебаниях электроупругих тел с внешними электрическими цепями на основе их электрического аналога // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2018. № 4. С. 266-277.
16. Патент RU № 2630537. Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А., опубл. 11.09.2017 Бюл. № 26.

17. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 288. P. 171-176.
18. Паньков А.А. Максвелл-вагнеровская релаксация электрических полей в пьезоэлектролюминесцентном оптоволоконном датчике вибродавления // *Журнал радиоэлектроники: электронный журнал*. 2017. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/6/text.pdf>
19. Турик А.В., Радченко Г.С. Гигантский пьезоэлектрический эффект в слоистых композитах сегнетоэлектрик-полимер // *Физика твердого тела*. 2003. Т.45. № 9. С. 1676-1679.
20. 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.
21. Долгинов А.И. Резонанс в электрических цепях и системах. Изд.-во: Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1957. 328 с.
22. Паньков А.А. Математическая модель импульсного сканирования давления по длине пьезоэлектролюминесцентного оптоволоконного датчика // *Вестник ПНИПУ. Механика*. 2018. № 1. С. 73-82.
23. 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, № 2. P. 229-242.

Для цитирования:

Паньков А.А. Динамическая модель управления режимом демпфирования вибраций оптоволоконным PEL-датчиком с фазовым сдвигом управляющего электрического напряжения. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.10.3>