



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.12>

УДК: 53.083.2; 53.082.73

## МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПТОВОЛОКОННОГО РЕЗОНАНСНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

А.А. Паньков, П.В. Писарев, С.Р. Баяндина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, д. 29

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2023 г.

**Аннотация.** Разработана электро-механическая математическая модель функционирования оптоволоконного резонансного пьезоэлектролюминесцентного (RPEL) датчика с наличием внешнего нелинейно упругого буферного слоя. Датчик предназначен для измерения спектра распределения по длине датчика динамического и/или статического давления с использованием резонансного метода диагностирования по результатам измерения спектра амплитуды интенсивности результирующего светового потока на выходе из оптоволокна датчика. Определены численные значения частотных характеристик (коэффициенты пропорциональности для информативной зависимости «давление/резонансная частота») оптоволоконного RPEL-датчика, которые используются в алгоритме нахождения спектра давления, для различных (первых шести) мод колебаний.

**Ключевые слова:** пьезоэлектроупругость, механолюминесцентный эффект, оптоволокно, датчик давления, модальный анализ, численное моделирование.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № [20-41-596010](#).

**Автор для переписки:** Паньков Андрей Анатольевич, [a\\_a\\_pankov@mail.ru](mailto:a_a_pankov@mail.ru)

## **Введение**

«Резонансный подход» [1-5] к диагностированию, в частности, температуры [6,7] или концентраций химических веществ [8-10] основан на зависимости резонансной частоты колебаний чувствительного пьезоэлектрического элемента датчика от искомой величины, что обуславливает высокую точность измерений. Пьезоэлектрические датчики, как правило, используют для измерения динамического (импульсного) давления, что обусловлено малыми значениями времени релаксации генерируемого пьезоэлементом электрического заряда. При этом величина электрического заряда более зависит от скорости, чем от величины нагрузления – действующего на пьезоэлемент давления. Измерение статического давления посредством пьезоэлектрического датчика возможно в рамках резонансного подхода [11] при использовании в конструкции датчика дополнительного конструктивного элемента - нелинейно упругого внешнего слоя (покрытия) с зависимостью жесткости этого элемента и, в целом, датчика от величины приложенного к нему давления, что обуславливает зависимость резонансной частоты колебаний датчика от искомого значения давления.

Цель – нахождение резонансных характеристик: собственных форм и частот колебаний оптоволоконного резонансного пьезоэлектролюминесцентного (RPEL) датчика [11] давления в результате численного моделирования представительного фрагмента датчика с наличием специального внешнего нелинейно упругого слоя как электромеханической системы на основе решения связанной стационарной краевой задачи электроупругости.

## 1. Оптоволоконный RPEL-датчик давления

Оптоволоконный резонансный RPEL-датчик для измерения давления  $p$  (рис. 1) [11] состоит из оптоволокна 1 с коаксиальными электролюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 цилиндрическими покрытиями (слоями), при этом оптоволокно 1 и электролюминесцентный слой 2 разделены светопрозрачным управляющим электродом 4, а на поверхности пьезоэлектрического слоя 3 последовательно расположены управляющий электрод 5 и внешний буферный (защитный) слой 6 из нелинейно упругого материала.

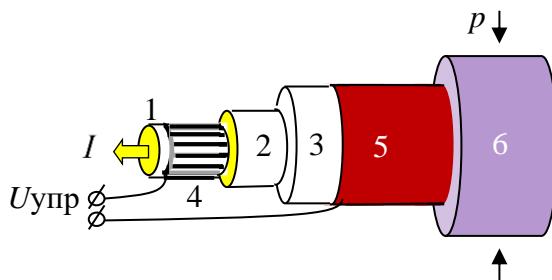


Рис. 1. Оптоволоконный RPEL-датчик: 1 – оптоволокно, 2 – электролюминофор, 3 – пьезоэлектрик, 4, 5 – электроды, 6 – нелинейно упругий буферный (защитный) слой,  $p$  – диагностируемое давление

К электродам датчика приложено переменное (гармоническое) управляющее электрическое напряжение  $U_{\text{упр}}$  с частотой  $v$ , что обуславливает вынужденные электромеханические колебания датчика. Информативный световой сигнал генерируется (внутри соответствующего «активированного» резонансным режимом колебаний локального участка электролюминесцентного слоя) в результате «механолюминесцентного» эффекта, обусловленного электрическим взаимодействием пьезоэлектрического и электролюминесцентного цилиндрических слоев (покрытий) вокруг оптоволокна.

Полагаем, что на каждом локальном участке датчика резонансная частота колебаний  $v_p = v_p(p)$  линейно зависит (с учетом нелинейности упругих свойств

элементов структуры, в частности, внешнего буферного слоя датчика) от действующего давления  $p$  и, как следствие, имеем пропорциональную зависимость приращения резонансной частоты от значения давления  $p$ :

$$\Delta_p \equiv \nu_p - \nu_0 \approx k_v p \quad (1)$$

где  $k_v$  – коэффициент пропорциональности для рассматриваемого диапазона значений  $p \in (p_{\min}; p_{\max})$ ,  $\nu_0$ ,  $\tilde{I}_0(\nu)$  – известное значение резонансной частоты ( $\nu_0$ ) и спектр амплитуды ( $\tilde{I}_0$ ) интенсивности результирующего светового потока на выходе из оптоволокна датчика для начального случая при  $p=0$ . Искомый спектр давления  $f_p(\zeta)$  – решение интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода:

$$\tilde{I}(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}_0(\nu - k_v \zeta) f_p(\zeta) d\zeta, \quad (2)$$

находим по измеряемому спектру  $\tilde{I}(\nu)$  амплитуды интенсивности результирующего светового потока на выходе из оптоволокна датчика. Для случая  $p=0$  имеем равенство  $\tilde{I}(\nu) = \tilde{I}_0(\nu)$  и искомая функция  $f_p(\zeta) = \delta(\zeta)$  – дельта-функция Дирака. Коэффициент  $k_v$  в (1), (2) является характеристикой датчика, численное значение которого может быть определено экспериментально или на основе численного моделирования представительного фрагмента датчика как электромеханической системы.

## 2. Результаты численного моделирования

Расчетная область (рис. 2) представительного осесимметричного фрагмента оптоволоконного RPEL-датчика давления (рис. 1) длиной  $l = 27.2\text{мм}$  состоит из оптоволокна с цилиндрическими концентрическими электролюминесцентным, пьезоэлектрическим и внешним буферным слоями с радиусами их межфазных поверхностей:  $r_{(1)}=1\text{мм}$ ,  $r_{(2)}=1.2\text{мм}$ ,  $r_{(3)}=1.4\text{мм}$ ,  $r_{(4)}=2.8\text{мм}$ , объем буферного слоя  $V_a \approx 502\text{мм}^3$ . Считаем, что торцы датчика неподвижны (закреплены), а внешняя боковая цилиндрическая поверхность буферного слоя нагружена давлением  $p$ . Определим собственные формы и

частоты  $v_{1,\dots,4}$  колебаний оптоволоконного RPEL-датчика в зависимости от величины действующего давления  $p$ .

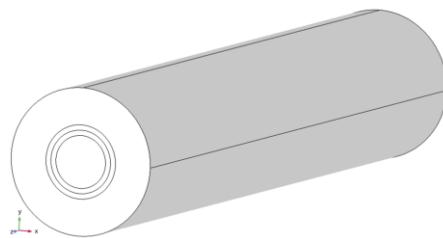


Рис. 2. Расчетная область оптоволоконного RPEL-датчика давления

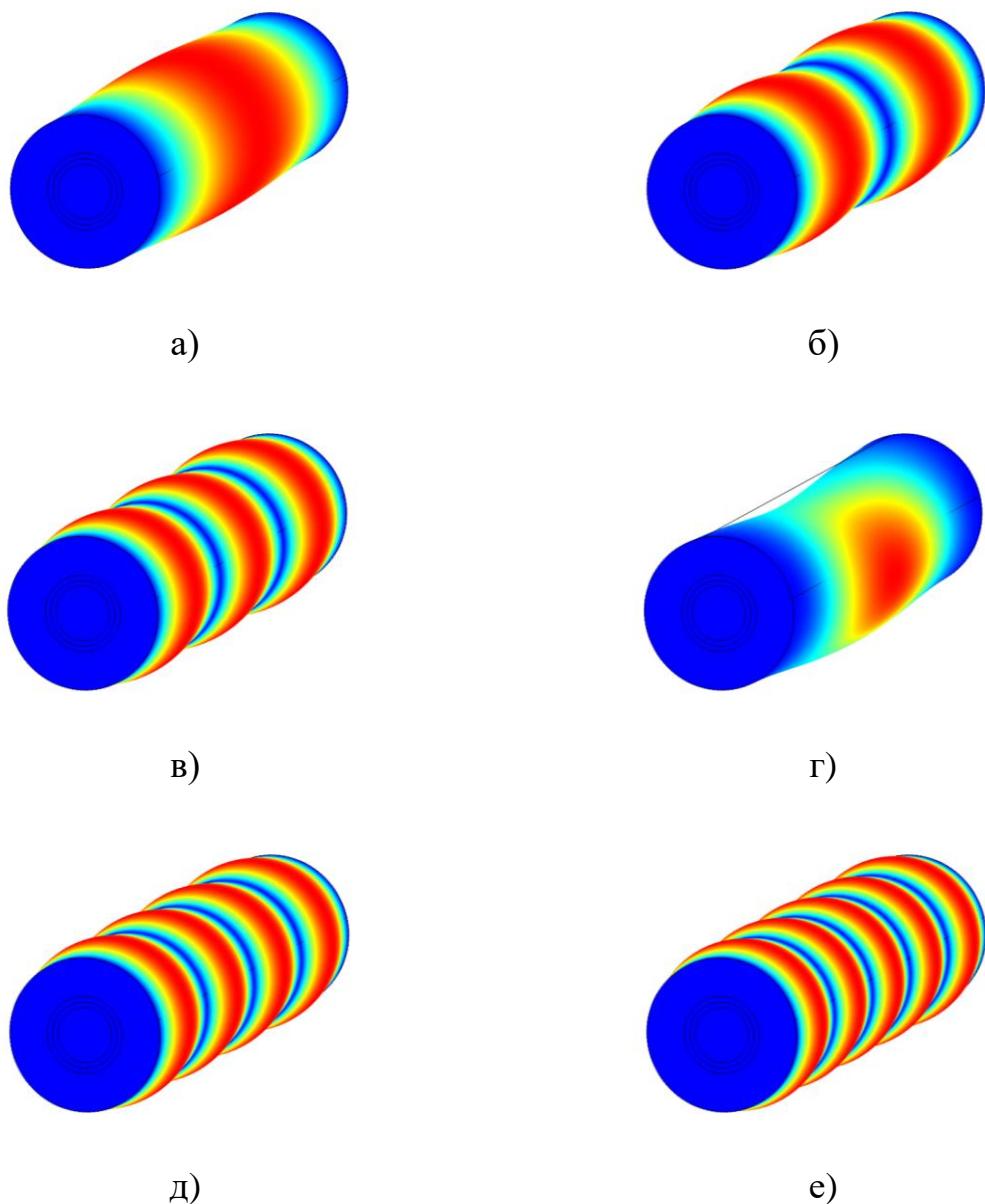
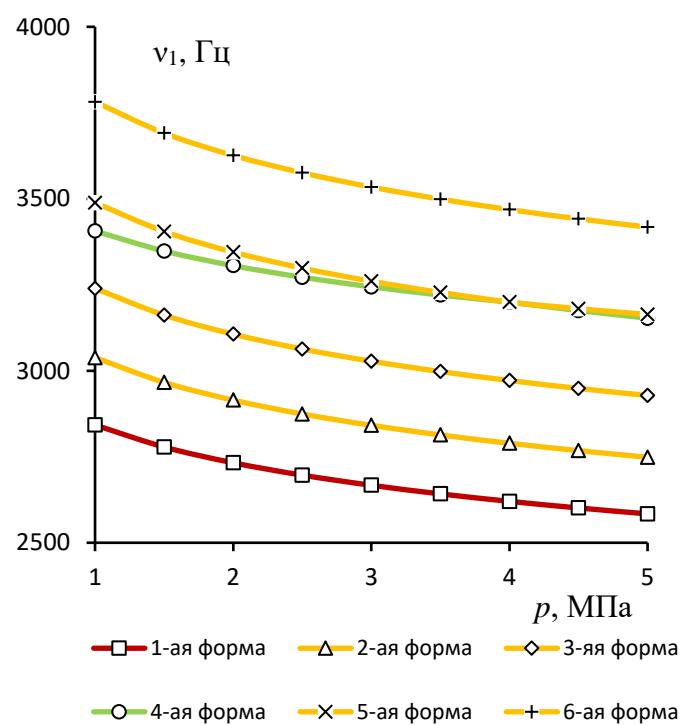


Рис. 3. Первые шесть собственных форм колебаний датчика

Таблица 1. Влияние давления  $p$  на собственные частоты  $\nu_{1,\dots,6}$  колебаний датчика

Давление $p$ , МПа	Собственные частоты, Гц					
	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$\nu_4$	$\nu_5$	$\nu_6$
1	2842.2	3038.3	3239.4	3406.1	3488.6	3781.6
1.5	2778.3	2966.2	3161.9	3348.1	3405.0	3691.0
2	2732.4	2914.6	3106.4	3305.6	3345.2	3626.2
2.5	2696.5	2874.4	3063.2	3272.0	3298.5	3575.6
3	2667.1	2841.4	3027.8	3244.0	3260.3	3534.2
3.5	2642.1	2813.4	2997.7	3220.1	3227.9	3499.1
4	2620.3	2789.2	2971.7	3199.2	3199.8	3468.6
4.5	2601.1	2767.7	2948.7	3175.0	3180.5	3441.7
5	2583.9	2748.6	2928.1	3152.8	3163.7	3417.7

Рис. 4. Влияние давления  $p$  на собственные частоты  $\nu_{1,\dots,6}$  первых шести форм колебаний датчика

## Заключение

Разработана электро-механическая математическая модель функционирования оптоволоконного RPEL-датчика для измерения спектра распределения (по длине датчика) не только динамического, но и статического давления  $p$  в рамках резонансного метода диагностирования по результатам измерения спектра амплитуды интенсивности результирующего светового потока на выходе из оптоволокна датчика. Оптоволоконный RPEL-датчик (рис. 1) [11] включает в себя, в отличие от ранее рассмотренной модели оптоволоконного PEL-датчика [6], дополнительный внешний нелинейно упругий буферный (защитный) слой. В результате действия на датчик диагностируемого давления происходит изменение значений жесткостных (упругих) характеристик буферного слоя и, как следствие, имеем информативное изменение значения резонансной частоты колебаний датчика (1) на каждой из мод колебаний датчика. Искомый «спектр давления» - функция плотности распределения по длине датчика значений давления  $p$  находим через решение интегрального уравнения Фредгольма (2) по результатам измерения информативного светового спектра интенсивности свечения  $I$  на выходе из оптоволокна датчика. Представлены результаты (рис. 3, рис. 4, табл.) модального анализа (ANSYS) представительного фрагмента оптоволоконного RPEL-датчика с наличием внешнего нелинейно упругого буферного слоя в зависимости от действующего диагностируемого статического давления. Определены численные значения частотных характеристик – коэффициентов пропорциональности для информативной зависимости «давление/резонансная частота» датчика, которые используются в алгоритме нахождения спектра давления, для различных (первых шести) мод колебаний.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №[20-41-596010](#).

## Литература

1. Tzou H.S. *Piezoelectric shells (Distributed sensing and control of continua)*. Kluwer Academic Publishers. 1993. 320 p.
2. Rubio W.M., Vatanabe S.L., Paulino G.H., Silva E.C.N. *Functionally graded piezoelectric material systems - a multiphysics perspective*. In book *Advanced computational materials modeling: from classical to multi-scale techniques*. Edited by Miguel Vaz J'unior, Eduardo A. de Souza Neto, Pablo A. Munoz-Rojas. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2011. 414 p. P.301-339.  
<http://dx.doi.org/10.1002/9783527632312>
3. Ebrahimi F. *Piezoelectric materials and devices-practice and applications*. IntechOpen. 2013. 176 p. <http://dx.doi.org/10.5772/45936>
4. Уорден К. *Новые интеллектуальные материалы и конструкции. Свойства и применение*. Москва, Техносфера. 2006. 224 с.
5. Берлинкур Д., Керран Д., Жаффе Г. *Пьезоэлектрические и пьезомагнитные материалы и их применение в преобразователях. Физическая акустика. Т.1. Методы и приборы ультразвуковых исследований*. Часть А. Москва, Мир. 1966. С.204-326.
6. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V.288. P.171-176.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2019.01.030>
7. Pan'kov A.A. Resonant piezoelectroluminescent fiber-optical sensor of a temperature field in composite structures. *Mechanics of Composite Materials*. 2019. V.55. №4. P.547-556. <http://dx.doi.org/10.1007/s11029-019-09833-w>
8. Каттрапл Р.В. *Химические сенсоры*. Москва, Научный мир, 2000. 144 с.
9. Белянкин С.Е. Сенсоры контроля концентрации газовых компонентов. (Обзор). *Фундаментальные исследования*. 2006. №2. С.49-51. URL:  
<https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=4722>

10. Паньков А.А., Писарев П.В., Баяндин С.Р. Резонансные характеристики сорбционного оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного датчика. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.4>
11. А.с. №2023102094. Паньков А.А. *Волоконно-оптический датчик давления*. Дата заявки: 31.01.2023 г. 7 с. URL: [https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips\\_servlet](https://www.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet)

**Для цитирования:**

Паньков А.А., Писарев П.В., Баяндин С.Р. Модальный анализ оптоволоконного резонансного пьезоэлектролюминесцентного датчика давления. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.6.12>