

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.6>
УДК 537.8

ОПТОВОЛОКОННЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ ДАТЧИК ИЗМЕРЕНИЯ ГРАДИЕНТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИН

А. А. Паньков

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

Статья поступила в редакцию 18 марта 2021 г.

Аннотация. Разработаны механико-математические модели поверхностных оптоволоконных пьезоэлектролюминесцентных (PEL) датчиков, устанавливаемых на поверхности полимерных композиционных конструкций, в частности, пластин (оболочек) для уточненного мониторинга неоднородных «градиентных» деформационных полей внутри конструкций. Даны постановки и схемы решения задач для представительного фрагмента системы «пластина/датчик» с целью нахождения численных значений управляющих и информативных, в том числе, «градиентных» передаточных коэффициентов PEL-датчиков. Представлены результаты численного расчета управляющих и информативных передаточных коэффициентов поверхностного PEL-датчика для случая малых значений градиентов диагностируемых мембранных, изгибных и крутильных деформаций трансверсально-изотропной упругой пластины.

Ключевые слова: пьезоэлектроупругость, механолюминесцентный эффект, оптоволоконно, поверхностный датчик, композитная пластина, численное моделирование.

Abstract. Mechanic-mathematical models of surface fiber optic piezoelectroluminescent (PEL) sensors installed on the surface of polymer composite structures, in particular, plates (shells) for refined monitoring of inhomogeneous "gradient" deformation fields inside structures, have been developed. There are given problem statements and problem solving algorithms for representative domain of

"plate/sensor" system in order to find numerical values of control and informative, including transfer "gradient" coefficients of PEL-sensors. Results of numerical calculation of control and informative transfer coefficients of surface PEL-sensor for case of small values of gradients of diagnosed membrane, bending and torsional deformations of transversal-isotropic elastic plate are presented.

Key words: piezo-electro-elasticity, mechanical-luminescent effect, optical fiber, surface sensor, composite plate, numerical modeling.

Введение

Для повышения надежности эксплуатации высоконагруженных элементов конструкций аэрокосмической техники из современных полимерных композиционных материалов, в частности, лопастей несущего винта вертолёта [1], корпуса и лопастей воздухозаборника авиационного двигателя [2] находят применение различные «дистанционные» и «контактные» оптико-электронные измерительные системы мониторинга напряженно-деформированного состояния [3-5]. Дистанционные оптико-электронные измерительные системы осуществляют бесконтактный мониторинг деформирования конструкции по результатам приема и цифровой обработки оптических сигналов, отраженных от поверхности конструкции [1,6,7], в частности, широкое применение нашли бесконтактные оптические методы: когерентно-оптический «метод электронной цифровой спекл-интерферометрии» [7] и «метод корреляции цифровых изображений» [8,9], с использованием которых исследуется деформированное состояние объектов не в отдельных точках, а в «континуальном» многоточечном формате по результатам измерения полей перемещений множества точек – маркеров на поверхности тел. Метод корреляции цифровых изображений используют для анализа деформированного состояния объектов различной размерности, например, двухмерных, трехмерных или в режиме виртуального оптического линейного тензометра. Метод корреляции цифровых изображений использован для измерения сильно-неоднородных полей в зонах концентраторов напряжений

[10,11], для изучения усталостного разрушения конструкционных материалов [12] и сложного напряженного состояния трубчатых образцов с использованием бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D [13].

Контактные оптико-электронные, в частности, оптоволоконные измерительные системы устанавливаются на поверхности или встраиваются внутрь конструкции, что позволяет диагностировать деформирование конструкции по информативным изменениям оптических сигналов в оптоволоконных линиях [14-19]. Оптоволоконные брэгговские решетки используют в качестве тензодатчиков, в частности, в волоконно-оптических виброакустических системах, когда оптоволоконные датчики встроены в объем композитной конструкции с целью определения локации и момента времени, например, ударного воздействия по поверхности лопасти вертолета [20]. Перспективным решением проблемы диагностирования неоднородных полей деформаций и наличия дефектов в элементах композитных конструкций являются сенсорные пьезоэлектрические сети [21-23], внедренные в структуру конструкции. В [24-26] предложены новые конструкции распределенных пьезоэлектролюминесцентных (PEL) оптоволоконных датчиков для уточненного диагностирования температуры, давления, объемного напряженно-деформированного состояния [25] по результатам цифровой обработки информативных интегральных оптических сигналов на выходе из оптического волокна датчика. Информативный световой сигнал обусловлен «механолюминесцентным эффектом» взаимодействия пьезоэлектрического и электролюминесцентного слоев датчика.

Цель – разработка механико-математической модели и расчетных схем вычисления управляющих и информативных передаточных коэффициентов поверхностного PEL-датчика в системе «пластина/датчик» для случая установки датчика на поверхности пластины (оболочки) для уточненного мониторинга неоднородных градиентных деформационных полей, в частности: мембранных, изгибных и крутильных деформаций трансверсально-изотропной пластины.

1. PEL-датчик, принцип функционирования

Оптоволоконный PEL-датчик (рис.1) [25] состоит из оптоволоконна 1 с коаксиальными электролюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 цилиндрическими покрытиями (слоями), при этом оптоволоконно 1 и электролюминесцентный слой 2 разделены «внутренним» светопрозрачным или перфорированным управляющим электродом 4, а на поверхности пьезоэлектрического слоя 3 расположен «внешний» управляющий электрод 5.

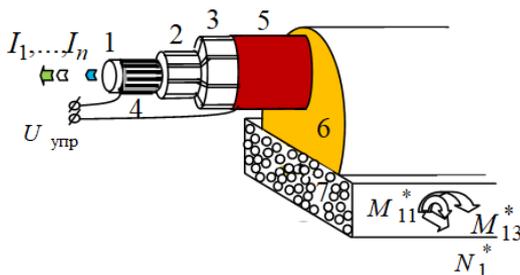


Рис.1. Поверхностный оптоволоконный PEL-датчик.

Для рассматриваемого случая (рис.1) установки оптоволоконного PEL-датчика на поверхности пластины (оболочки) датчик размещен внутри корпуса 6, выполненного, например, в виде внешней однородной полуэллиптической цилиндрической защитной оболочки, посредством которой происходит передача на чувствительные пьезоэлектрические элементы 3 датчика информативных деформационных полей от диагностируемого сложного пространственного напряженно-деформированного состояния композитной пластины 7 через границу механического контакта пластины 7 с основанием корпуса 6. Электролюминесцентный 2 и пьезоэлектрический 3 слои разделены общими для обоих слоев радиально-продольными границами на геометрически равные n «измерительных элементов» - цилиндрических двухслойных секторов, число которых равно числу n диагностируемых характеристик деформированного состояния пластины. В измерительных элементах направления \mathbf{d}_j пространственных поляризации пьезоэлектрических фаз (пьезоэлементов) и частоты светоотдач электролюминесцентных фаз различны по всем n секторам; направления поляризации пьезоэлементов для случая $n \geq 3$ задаются из условия некомпланарности направлений поляризации для

произвольных трех секторов датчика, $j = \overline{1, n}$. Пьезоэлектрические элементы могут представлять собой различные или один и тот же пьезоэлектрик, например, трансверсально-изотропный полимерный материал PVDF [27], но с различными пространственными направлениями \mathbf{d}_j поляризации по секторам [25]; направление поляризации является осью симметрии трансверсально-изотропного пьезоэлектрика PVDF.

Поверхностный оптоволоконный PEL-датчик (рис.1) предназначен для диагностирования сложного пространственного напряженно-деформированного состояния пластин (оболочек) вдоль установленного на поверхности объекта датчика, в частности, для нахождения результирующих значений $\mathbf{N}^* = \{N_1, N_3, M_1, M_3, H_1, H_3\}$ посредством обработки приемником-анализатором интенсивностей интегральных полихромных световых сигналов I_1, \dots, I_n на выходе из оптоволоконна датчика, где осевые усилия $N_{1,3}$, изгибающие $M_{1,3}$ и крутящие $T_{1,3}$ моменты в протяженных локальных областях пластин вдоль установленного на поверхности датчика, n - число диагностируемых параметров, в частности, $n=6$, если градиенты $\nabla \mathbf{N}^* = 0$ или $n=12$, если, например, лишь градиент $\partial \mathbf{N}^* / \partial r_3 \neq 0$. Поверхностный оптоволоконный PEL-датчик работает следующим образом. Диагностируемые значения пространственного напряженно-деформированного состояния пластины \mathbf{N}^* , $\nabla \mathbf{N}^*$ приводят к деформированию установленного на поверхности пластины всего датчика (рис.1) и, в частности, каждого из его пьезоэлектрических элементов с возникновением в них информативных электрических полей, визуализация которых происходит на соответствующих электролюминесцентных элементах внутри каждого «измерительного элемента» - двухслойного кругового сектора «пьезоэлектрик/люминофор» датчика. Возникающие в секторах люминофора информативные полихромные световые сигналы проникают через боковую поверхность оптоволоконна внутрь, распространяются по нему и регистрируются на выходе из оптоволоконна

приемником-анализатором интенсивностей оптических сигналов. Управляющее электрическое напряжение $U_{упр}$ прикладывается к электродам оптоволоконного PEL-датчика для реализации различных алгоритмов диагностирования [25,26].

2. Управляющие и информативные коэффициенты «градиентного» PEL-датчика

В случае наличия больших градиентов ∇N^* диагностируемых значений N^* необходимо учитывать вносимые ими поправки (к измеряемым PEL-датчиком значениям N^*), обусловленные градиентом, в частности, по координате r_3 деформационных и электрических полей в измерительных элементах «пьезоэлектрик/люминофор» оптоволоконного PEL-датчика. В этом случае информативные значения интенсивностей свечений локальных участков dr_3 секторов электролюминесцентного (EL) слоя датчика в сечении r_3 будут зависеть не только от диагностируемых значений деформаций $N^*(r_3)$, но и от значений градиентов $\partial N^* / \partial r_3$ в этом сечении. Поэтому, для решения поставленной задачи необходимо использовать «градиентный» датчик с 12-ю измерительными PEL элементами (рис.1), посредством которого можно найти не только значения $N^*(r_3)$, но и их градиенты $\partial N^* / \partial r_3$ в каждом сечении с координатой r_3 датчика с учетом разложения

$$U_{люм(j)} = a_{U(j)} U_{упр} + \sum_{k=1}^n a_{(j,k)}^{(0)} N_k^* + \sum_{k=1}^n a_{(j,k)}^{(1)} \frac{\partial N_k^*}{\partial r_3} \quad (1)$$

с использованием управляющих $a_{U(j)}$, информативных основных $a_{(j,k)}^{(0)}$ [26] и новых «градиентных» $a_{(j,k)}^{(1)}$ передаточных коэффициентов датчика, где $j = \overline{1,12}$, $k = \overline{1,6}$. Дополнительный учет (и нахождение) вторых производных $\partial^2 N^* / \partial r_3^2$ становится возможным при увеличении в датчике числа измерительных элементов до 18-ти; в этом случае, в правой части (1) появляется дополнительное слагаемое $a_{(j,k)}^{(2)} \partial^2 N_k^* / \partial r_3^2$.

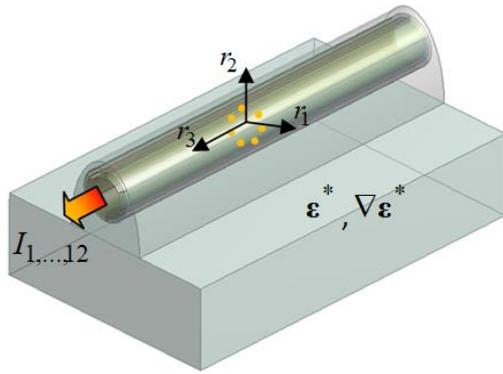


Рис.2. Расчетная область «пластина/датчик».

Для рассматриваемого случая, когда учитываем лишь градиенты $\partial N^* / \partial r_3$ по продольной координате r_3 , тогда задача нахождения 12-ти информативных $a_{(j,k)}^{(0)}$, $a_{(j,k)}^{(1)}$ передаточных коэффициентов датчика в (1) сводится к решению 12-ти независимых «простых» задач для представительного фрагмента «пластина/датчик» (рис.2) с единичными нагрузками фрагмента пластины. При этом электрические потенциалы «измеряем» в контрольных точках круговых секторов датчика на границе «электролюминофор/пьезоэлектрик» в центральном поперечном сечении фрагмента «пластина/датчик» при $r_3 = 0$.

В частности, нахождение 6-ти управляющих коэффициентов $a_{U(j)}$ в (1) сводится к решению одной вспомогательной задачи для свободного (от внешних механических нагрузок, $N^* = 0$) фрагмента «пластина/датчик», когда нагружение осуществляется посредством задания управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}} = 1\text{В}$ на электродах датчика.

Нахождение значений 6-ти информативных передаточных коэффициентов $a_{(j,k)}^{(0)}$ в (1) сводится к решению задач для фрагмента «пластина/датчик», когда на участках границ $r_1 = \pm l_1 / 2$ или $r_3 = \pm l_3 / 2$ срединной поверхности фрагмента пластины заданы соответствующие единичные значения погонных результирующих осевых усилий $\bar{N} = 1\text{Н/м}$, моментов $\bar{M} = 1\text{Н}$, в частности: 1) для двух задач об одноосных «мембранных» растяжениях по осям r_1 или r_3 необходимо задать на участках границ $r_1 = \pm l_1 / 2$ или $r_3 = \pm l_3 / 2$ значения погонных результирующих осевых усилий $N_1 = \bar{N}$ или $N_3 = \bar{N}$, 2) для двух задач

об изгибах в плоскостях r_1r_2 или r_2r_3 необходимо задать на участках границ $r_1 = \pm l_1/2$ или $r_3 = \pm l_3/2$ значения погонных результирующих изгибающих моментов $M_{13} = \bar{M}$ или $M_{31} = \bar{M}$, 3) для двух задач о кручениях вокруг осей r_1 или r_3 необходимо задать на участках границ $r_1 = \pm l_1/2$ или $r_3 = \pm l_3/2$ значения погонных результирующих изгибающих моментов $M_{11} = \bar{M}$ или $M_{33} = \bar{M}$, соответственно.

Нахождение 6-ти «градиентных» информативных коэффициентов $a_{(j,k)}^{(1)}$ в (1) сводится к решению 6-ти вспомогательных задач с «единичным градиентом» по оси r_3 условий нагружений для представительного фрагмента «пластина/датчик» (рис.2). В *первой группе* из трех задач с «единичным градиентом» по оси r_3 нагружение представительного фрагмента «пластина/датчик» осуществляется посредством приложения равномерно распределенных (по срединной поверхности пластины - плоскости r_1r_3) результирующих сил и моментов с единичными интенсивностями $\bar{p} = 1\text{Н/м}^2$ и $\bar{m} = 1\text{Н/м}$ с соответствующими граничными значениями сил и моментов. Для случая линейно-неоднородного растяжения фрагмента «пластина/датчик» вдоль оси r_3 необходимо задать лишь ненулевые значения интенсивности однородного распределения по срединной поверхности r_1r_3 пластины осевой нагрузки $p_3 = \bar{p}$, направленной вдоль оси r_3 , при этом на границах срединной поверхности при значениях $r_3 = \pm l_3/2$ заданы значения результирующей погонной осевой силы $N_3 = \pm \bar{p}l_3/2$, где $l_{1,3}$ - длины пластины вдоль $r_{1,3}$, соответственно. Для случая линейно-неоднородного изгиба фрагмента «пластина/датчик» в плоскости r_2r_3 распределенными изгибающими моментами m_{31} необходимо задать лишь ненулевые значения интенсивности однородного распределения по срединной поверхности r_1r_3 пластины изгибающих моментов $m_{31} = \bar{m}$, при этом на границах срединной поверхности при значениях $r_3 = \pm l_3/2$ заданы значения результирующего погонного изгибающего момента

$M_{31} = \pm \bar{m}l_3/2$, соответственно. Для случая *линейно-неоднородного* кручения фрагмента «пластина/датчик» распределенными крутящими моментами m_3 вокруг оси r_3 необходимо задать лишь ненулевые значения интенсивности однородного распределения по срединной поверхности r_1r_3 пластины крутящих моментов $m_{33} = \bar{m}$, при этом на границах срединной поверхности при значениях $r_3 = \pm l_3/2$ заданы значения результирующего крутящего момента $M_{33} = \pm \bar{m}l_3/2$, соответственно.

Во *второй группе* из трех задач с «единичным градиентом» по оси r_3 для представительного фрагмента «пластина/датчик» достаточно задать значения погонных усилий N_1 , моментов M_{11} или M_{13} лишь на соответствующих участках границы срединной поверхности представительного фрагмента. В частности, для задач *линейно-неоднородного одноосного растяжения* по оси r_1 или *изгиба в плоскости r_1r_2* или *кручения* вокруг оси r_1 необходимо задать на участках границ $r_1 = \pm l_1/2$ значения погонных результирующих осевых усилий $N_1 = \bar{p}r_3$ или *изгибающих моментов* $M_{13} = \bar{m}r_3$ или *крутящих моментов* $M_{11} = \bar{m}r_3$, соответственно, где координата $r_3 \in (-l_3/2; l_3/2)$.

Отметим, что результирующие электрические напряжения $U_{\text{люм}(j)}$ (1) на электролюминесцентных элементах круговых секторов поверхностного PEL-датчика (рис.1) могут быть представлены иным линейным разложением вида

$$U_{\text{люм}(j)} = a_{U(j)}U_{\text{упр}} + \sum_{k=1}^n a_{\varepsilon(j,k)}^{(0)} \varepsilon_k^* + \sum_{k=1}^n a_{\varepsilon(j,k)}^{(1)} \frac{\partial \varepsilon_k^*}{\partial r_3} \quad (2)$$

с использованием управляющих $a_{U(j)}$ и обобщенных деформационных информативных $a_{\varepsilon(j,k)}^{(0)}$, $a_{\varepsilon(j,k)}^{(1)}$ передаточных коэффициентов датчика для диагностирования компонент ε_k^* обобщенных деформаций $\varepsilon^* = \{\varepsilon_1^*, \varepsilon_3^*, \theta_1^*, \theta_3^*, \kappa_1^*, \kappa_3^*\}$ фрагмента пластины, где мембранные осевые деформации $\varepsilon_1^* \equiv \varepsilon_{11}^*$, $\varepsilon_3^* \equiv \varepsilon_{33}^*$, относительные углы поворотов поперечных сечений $\theta_{1,3}^*$ при закручиваниях

фрагмента вокруг поперечной r_1 и продольной r_3 осей, кривизны $\kappa_{1,3}$ «изогнутых» осей $r_{1,3}$ нейтрального слоя фрагмента пластины при его изгибах в поперечной $r_1 r_2$ и продольной $r_2 r_3$ плоскостях.

3. Результаты численного моделирования

Численный расчет электроупругих полей для различных простых нагружений представительного фрагмента «пластина/датчик» (рис.2), в частности, закручивания представительного фрагмента вокруг продольной оси (рис.3) осуществлен с использованием пакета конечно-элементного анализа ANSYS для случая пренебрежимо малых значений градиентов $\nabla \varepsilon^* \approx 0$ диагностируемых значений ε^* при наличии шести ($n=6$) измерительных секторов в РЕЛ-датчике (рис.1, рис.2). В результате, найдены численные значения управляющих $\mathbf{a}_U = \{1.0000, 0.99944, 1.0000, 1.0003, 1.0005, 1.0000\}$ и информативных

$$\mathbf{a}_\varepsilon^{(0)} = \begin{bmatrix} -12.287 & -0.565 & -0.379 & 0.173 & -0.578 & -7.793 \\ -9.872 & 2.791 & 0.356 & -1.049 & 4.432 & 0.786 \\ 7.137 & -2.530 & -2.208 & 0.721 & 3.571 & 7.247 \\ 4.413 & 0.147 & -0.297 & -0.014 & 7.141 & -2.189 \\ 26.845 & 5.316 & 0.595 & -2.089 & -1.510 & -5.564 \\ 15.969 & -17.883 & -9.144 & 4.166 & -9.948 & -5.526 \end{bmatrix} \quad (3)$$

передаточных коэффициентов (2) РЕЛ-датчика, где размерности численных значений компонент $a_{\varepsilon(j,k)}^{(0)}$ (3) в первом и втором столбцах - [В], а в остальных четырех столбцах - [Вм/рад], определитель $|a_{\varepsilon(j,k)}| \neq 0$.

На практике при сложном комбинированном нагружении фрагмента «пластина/датчик» искомые значения компонент ε_k^* обобщенных деформаций $\varepsilon^* = \{\varepsilon_1^*, \varepsilon_3^*, \theta_1^*, \theta_3^*, \kappa_1^*, \kappa_3^*\}$ фрагмента пластины находим из решения системы

линейных алгебраических уравнений $\sum_{k=1}^n a_{\varepsilon(j,k)} \varepsilon_k^* = \Delta_j$ по информативным

значениям компонент $\Delta_j \equiv U_{\text{люм}(j)} - a_{U(j)} U_{\text{упр}}$, где численные значения электрических напряжений $U_{\text{люм}(j)}$ на электролюминесцентных элементах PEL-датчика находятся по алгоритмам цифровой обработки информативных интенсивностей $I_{1,\dots,6}$ интегральных полихромных световых сигналов на выходе из оптоволоконна датчика с учетом известной, например, S-образной зависимости интенсивностей свечения I_j электролюминесцентных элементов от величины приложенных к ним электрических напряжений $U_{\text{люм}(j)}$ [25,26].

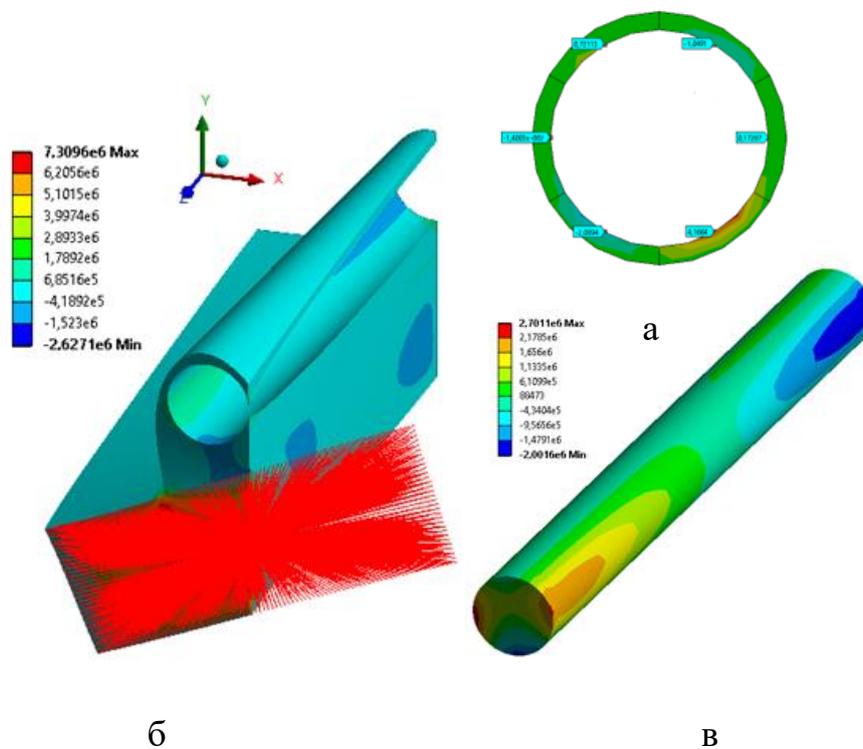


Рис.3. Электрические потенциалы $\Phi_{1,\dots,6}$ в шести контрольных точках (а) и поле напряжений σ_{xy} в составной области «пластина/датчик» (б), (в) при закручивании вокруг оси z .

Заключение

Разработаны численные модели оптоволоконного PEL-датчика (рис.1) с учетом пространственных, в частности, продольных по оси r_3 градиентов диагностируемого сложного объемного напряженного состояния [24] в системе

«пластина/датчик» для случая установки датчика на поверхности анизотропной пластины из полимерного композиционного материала. Диагностирование напряженно-деформированного состояния пластины осуществляется в ее локальной области (окрестности) вдоль установленного на поверхности пластины датчика по результатам обработки приемником-анализатором интенсивностей интегральных полихромных световых сигналов на выходе из оптоволокна датчика. Даны постановки и схемы решения задач для представительного фрагмента системы «пластина/датчик» с целью нахождения численных значений управляющих и информативных, в том числе, «градиентных» передаточных коэффициентов РЕЛ-датчиков. Представлены результаты численного расчета управляющих и информативных передаточных коэффициентов поверхностного РЕЛ-датчика для случая малых значений градиентов диагностируемых мембранных, изгибных и крутильных деформаций трансверсально-изотропной пластины.

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

Литература

1. Данилин А.И., Жуков С.В. Оптоэлектронные системы определения деформационного состояния несущего винта вертолёта. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. №4-6. С.1307-1314.
2. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Пеленев К.А., Писарев П.В., Шипунов Г.С. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния композитного шпангоута авиационного назначения для разработки методики контроля с применением волоконно-оптических датчиков. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2018. №4. С 47-57.
3. Уорден К. *Новые интеллектуальные материалы и конструкции*. Москва, Техносфера. 2006. 223 с.

4. Федотов М.Ю., Сорокин К.В., Гончаров В.А., Шиенок А.М., Зеленский П.В. Возможности сенсорных систем и интеллектуальных ПКМ на их основе. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2013. №2. С.18-23.
5. Сорокин К.В., Мурашов В.В. Мировые тенденции развития распределенных волоконно-оптических сенсорных систем (Обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3. С.90-94.
6. Луценко А.Н., Одинцев И.Н., Гриневич А.В., Северов П.Б., Плугатарь Т.П. Исследование процесса деформации материала оптико-корреляционными методами. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S4. С.70-86.
7. Минеев С.А., Угольников А.Ю., Лозовская Л.Б. Анализ спекл-изображений деформируемой поверхности на основе алгоритмов обработки оптического потока. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2014. №2 (1). С.81–86.
8. Ильичев А.В., Губин А.М., Акмеев А.Р., Иванов Н.В. Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений. *Труды ВИАМ*. 2018. №6. С.99-109.
9. Надеждин К.Д., Шарнин Л.М., Кирпичников А.П. Визуальные методы определения деформаций и напряжений на поверхности испытываемых конструкций. *Вестник Казанского технологического университета*. 2016. №12. С.143-146.
10. Ильичев А.В., Раскутин А.Е. Исследование влияния концентратора напряжений на напряженно-деформационное состояние углепластика методом корреляции цифровых изображений. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № (32). С 62-66.
11. Семенова О.В., Морозов О.А. Метод прецизионного уточнения полей неоднородных смещений и деформаций на поверхности материалов. *Физическая мезомеханика*. 2003. №3. С.99-105.
12. Любутин П.С., Панин С.В., Титков В.В., Еремин А.В., Сундер Р. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов

- деформации и разрушения конструкционных материалов. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. 2019. №1. С.87-107.
13. Староверов О.А., Струнгарь Е.М., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Особенности экспериментальных исследований трубчатых образцов композиционных материалов в условиях сложного напряженного состояния. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2017. №51. С.104-114.
14. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М., Шелемба И.С. Волоконно-оптические датчики для мониторинга коррозионных процессов в узлах авиационной техники (обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №3. С.26-34.
15. Рузаков И.А. Мониторинг деформационного состояния элементов конструкции из ПКМ на основе волоконно-оптических датчиков (обзор). *Труды ВИАМ*. 2019. №4. С.88-98.
16. Качура С.М., Постнов В.И. Перспективные оптоволоконные датчики и их применение (обзор). *Труды ВИАМ*. 2019. №5. С.52-61.
17. Серьёзов А.Н., Кузнецов А.Б., Лукьянов А.В., Брагин А.А. Применение оптоволоконных технологий при создании встроенных систем самодиагностики авиационных конструкций. *Научный вестник НГТУ. Авиационная и ракетно-космическая техника*. 2016. №3. С.95-105.
18. Будадин О.Н., Кульков А.А., Кутюрин В.Ю. Волоконно-оптические датчики с решётками Брэгга для мониторинга напряженно-деформированного состояния изделий из композиционных материалов. *Конструкции из композиционных материалов*. 2018. №2. С.60-67.
19. Мунько А.С., Варжель С.В., Архипов С.В., Коннов К.А., Петров А.Б. Разработка чувствительного элемента волоконно-оптического тензометрического датчика на основе решеток Брэгга. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2017. №4. С.340-346.

20. Liu Y., Lacher A., Wang G., Purekar A., Yu M. Wireless fiber optic sensor system for strain and pressure measurements on a rotor blade. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2007. No.67700Y.
21. Patent US 20060254366 A1. *Sensor and sensor array for monitoring a structure*. Caroline Williamson, Lisa Fixter (nee Humberstone), Andrew Clark. Published on November 16, 2006.
22. Patent US 7458266 B2. *Method and apparatus for detecting a load change upon a structure and analyzing characteristics of resulting damage*. Shawn J. Beard, Xinlin Qing, Hian Leng Chan, Chang Zhang, Fuo-Kuo Chang. Published on December 2, 2008.
23. Patent US 6399939 B1. *Sensor array system*. Mannur J. Sundaresan, Anindya Ghoshal, Mark J. Schulz. Published on June 4, 2002.
24. Patent RU No. 2643692. *Fiber-Optic Volumetric Stress Sensor*. Pan'kov A.A. Published 05.02.2018, Bul. № 4. Application № 2017111405 dated 4.04.2017.
25. Pan'kov A.A. A piezoelectroluminescent fiber-optical sensor for diagnostics of the 3D stress state in composite structures. *Mechanics of Composite Materials*. 2018. №2. P.155-164.
26. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Phys.* 2019. Vol.288. P.171-176.
27. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981. No.6. P.1596-1608.

Для цитирования:

Паньков А.А. Оптоволоконный пьезоэлектролюминесцентный датчик измерения градиентного деформирования пластин. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.6>