

Паньков А.А., Писарев П.В. Частотные характеристики встраиваемого оптоволоконного PEL-датчика для диагностирования сложных гармонических деформаций внутри полимерной композитной конструкции // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 3. С. 103–116. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.10

Pan'kov A.A., Pisarev P.V. Frequency Characteristics of Built-in Fiber-Optic PEL-Sensor to Diagnose Complex Harmonic Deformations within the Polymer Composite Structure. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2021, no. 3, pp. 103-116. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.10



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2021

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index>



DOI: 10.15593/perm.mech/2021.3.10

УДК 539.3; 531.787.5

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВСТРАИВАЕМОГО ОПТОВОЛОКОННОГО PEL-ДАТЧИКА ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ГАРМОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ВНУТРИ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

А.А. Паньков, П.В. Писарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 14 апреля 2021 г.
Принята: 3 августа 2021 г.
Опубликована: 22 октября 2021 г.

Ключевые слова:

пьезоэлектроупругость, механолюминесцентный эффект, встраиваемый оптоволоконный датчик, полимерный композит, диагностика, численное моделирование.

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены основы функционирования оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного (PEL) датчика внутри полимерной композитной конструкции при ее циклическом нагружении. Оптоволоконный PEL-датчик рассматривается как часть электромеханической системы «композит-датчик» с учетом наличия анизотропии, пьезоактивности и максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей элементов датчика. Назначение оптоволоконного PEL-датчика – диагностирование неоднородного сложного объемного деформированного состояния протяженной цилиндрической области (окрестности вдоль встроенного линейного датчика) внутри циклически нагруженной композитной конструкции. Разработана численная модель решения пространственной связанной краевой задачи электроупругости для представительного фрагмента системы «композит/датчик» в пакете ANSYS. Осуществлено численное моделирование деформационных и электрических гармонических полей внутри представительного фрагмента, в частности найдены распределения амплитуд этих полей в элементах структуры оптоволоконного PEL-датчика. Выявлены резонансные режимы и проанализированы закономерности частотных зависимостей для действительных и мнимых частей управляющих и информативных передаточных коэффициентов встроенного оптоволоконного PEL-датчика в системе «композит-датчик». Дополнительно даны графики частотных зависимостей тангенсов углов механических потерь для различных случаев деформирования системы «композит-датчик». Демпфирование системы «композит-датчик» осуществляется в результате преобразования оптоволоконным PEL-датчиком некоторой части механической энергии (передаваемой от композита к датчику при их совместном деформировании) в джоулево тепло с последующим рассеиванием, что обусловлено прямым пьезоэффектом и максвелл-вагнеровской релаксацией электрических полей в элементах датчика. Установлен частотный диапазон деформирования системы «композит-датчик», при котором наиболее эффективно реализуется режим пассивного демпфирования вибраций. Численно подтверждено, что для предельного высокочастотного случая деформирования системы «композит-датчик» релаксационные процессы не реализуются и, как следствие, решения для управляющих и информативных передаточных коэффициентов PEL-датчика практически совпадают с ранее полученными численными решениями, в которых не учитывались электрические проводимости элементов структуры датчика.

© ПНИПУ

© Паньков Андрей Анатольевич – д.ф.-м.н., проф., e-mail: a_a_pankov@mail.ru, [iD: 0000-0001-8477-5206](https://orcid.org/0000-0001-8477-5206)
Писарев Павел Викторович – к.т.н., доц., e-mail: pisarev@pstu.ru, [iD: 0000-0001-5103-4815](https://orcid.org/0000-0001-5103-4815)

Andrey A. Pan'kov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: a_a_pankov@mail.ru,

[iD: 0000-0001-8477-5206](https://orcid.org/0000-0001-8477-5206)

Pavel V. Pisarev – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: pisarev@pstu.ru, [iD: 0000-0001-5103-4815](https://orcid.org/0000-0001-5103-4815)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF BUILT-IN FIBER-OPTIC PEL-SENSOR TO DIAGNOSE COMPLEX HARMONIC DEFORMATIONS WITHIN THE POLYMER COMPOSITE STRUCTURE

A.A. Pan'kov, P.V. Pisarev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 14 April 2021
Accepted: 3 August 2021
Published: 22 October 2021

Keywords:

piezoelectroelasticity,
mechanoluminescent effect,
built-in fiber optic sensor,
polymer composite, diagnostics,
numerical modeling.

ABSTRACT

Fundamentals of operation of an optical fiber piezoelectroluminescent (PEL) sensor inside a polymer composite structure at its cyclic loading are considered. The optical fiber PEL-sensor is considered as part of the *composite/sensor* electromechanical system taking into account the presence of anisotropy, piezoactivity and Maxwell-Wagner relaxation of the electric fields of the sensor elements. The purpose of the optical fiber PEL-sensor is to diagnose the inhomogeneous complex volumetric deformed state of a long cylindrical area (a neighborhood along the built-in linear sensor) inside a cyclically loaded composite structure. A numerical model has been developed to solve the 3D related boundary value problem of electric elasticity for a representative fragment of the system *composite/sensor* in the ANSYS package. The numerical modeling of deformation and electric harmonic fields inside the representative fragment was carried out; in particular, distributions of amplitudes of these fields in elements of the structure of the optical fiber PEL sensor were found. The resonant modes are revealed, and the analysis is given of regularities of frequency dependences for the real and imaginary parts of controlling and informative transfer coefficients of the built-in fiber-optic PEL-sensor in the *composite/sensor* system. Additionally, graphs of frequency dependencies of tangents of mechanical loss angles for various cases of deformation of the *composite/sensor* system are given. Damping of the *composite/sensor* system is carried out as a result of the conversion of some part of the mechanical energy (transmitted from the composite to the sensor during their joint deformation) into Joule heat by the fiber-optic PEL sensor with a subsequent dispersion. The latter is caused by the direct piezoelectric effect and Maxwell-Wagner relaxation of electric fields in the sensor elements. The frequency range of deformation of the composite/sensor system is set, in which the passive vibration damping mode is most effectively implemented. It is numerically confirmed that for the extreme high-frequency case of deformation of the composite/sensor system, relaxation processes are not implemented and, as a result, solutions for the controlling and informative transfer coefficients of the PEL-sensor practically coincide with previously obtained numerical solutions that did not take into account the electrical conductivity of the sensor structure elements.

© PNRPU

Введение

Одной из основных задач современного приборостроения является разработка сенсорной техники (датчиков) на основе различных физических принципов функционирования и совершенствование алгоритмов цифровой обработки регистрируемых информативных, в частности, электрических и/или оптических сигналов с учетом измерительной цепи датчика [1–3]. Пьезоэлектрические датчики [4] относятся к датчикам генераторного (активного) типа, они формируют необходимую измерительную информацию, которая далее используется системами контроля и/или управления, в частности, для различных изделий и агрегатов ракетно-космической и авиационной техники [3, 5]. Современные численные методы электроупругости позволяют с хорошей точностью находить вид передаточной функции (коэффициентов) пьезоэлектрического датчика с учетом геометрических и электромеханических свойств его элементов [2]. Выявлено [1], что выходное электрическое напряжение пьезоэлектрического датчика определяется соотношением длительности импульса давления и «постоянной времени» измерительной цепи

датчика. Проведен анализ влияния различных факторов на точность измерения пьезоэлектрических датчиков быстропеременного давления [3], разработана математическая метрологическая модель, с использованием которой определены величина и структура погрешностей датчика с целью дальнейшей ее минимизации. Различные аспекты повышения точности пьезоэлектрических датчиков исследованы в [6, 7], в частности, реализована коррекция температурных погрешностей пьезоэлектрических датчиков давления [6] с целью расширения температурного рабочего диапазона датчиков. Обоснованы преимущества [7] использования фазового формата вместо традиционного частотного формата для выходного информативного электрического сигнала датчика поверхностных акустических волн с целью нахождения равновесного количества молекул газа (воды), адсорбированного на поверхности пьезоэлектрического резонатора. Пьезоэлектрические элементы используются в системах локации [8] и/или встраиваются в индикаторные полимерные покрытия [9] с целью диагностирования внешних тактильных или ударных воздействий, в частности ударов или вдавливающих жестких шаровых частиц. В [8] дан анализ ре-

зультатов экспериментальных исследований по локации удара жесткой частицы с использованием системы из четырех пьезодатчиков, установленных на поверхности конструкции. Пьезодатчики, установленные на корпусе космических аппаратов, позволяют регистрировать и изучать плотность потока, в том числе очень мелких высокоскоростных частиц [10–12]. Очистка поверхности конструкции от «загрязнений», в частности пыли, льда, может быть осуществлена актюаторным воздействием пьезоэлементов на присоединенные частицы в результате обратного пьезоэлектрического эффекта [8,13]. С использованием подхода электромеханической аналогии разработаны [14–17] математические модели систем активного демпфирования вибраций конструкций пьезоактюаторами с внешней электрической цепью управления и оптимизации режима демпфирования в требуемом частотном диапазоне.

В [18, 19] рассмотрены «проводные» пьезоэлектрические датчики в виде коаксиального кабеля, в котором область между центральным сердечником и внешней оплеткой заполнена диэлектриком – пьезополимером PVDF. Проводной датчик [19] устанавливается вдоль трубопровода для локации места его повреждения посредством измерения промежутка времени между моментами приходов пьезоэлектрического сигнала на различные концы (торцы) этого датчика. Информативный пьезоэлектрический сигнал возникает на локальном участке полимерного слоя PVDF проводного датчика [19] в силу прямого пьезоэффекта под воздействием шума и вибрации трубы в окрестности места утечки. Коаксиальная конструкция проводного датчика [19] делает его самозащищенным, что позволяет использовать его в условиях высоких электромагнитных помех. Перспективными являются датчики на основе «*механолюминесцентного эффекта*» – светоотдачи при механическом воздействии, который может проявляться как для однородных [20–22], так и композитных с пьезоэлектрической и электролюминесцентной фазами материалов [23, 24]. Механолюминесцентный эффект использован в пьезоэлектрическом датчике [24] для визуализации и мониторинга вибраций, где установлено, что амплитуда интенсивности свечения датчика зависит от величины и частоты его вибрации.

В [25–27] предложены новые оптоволоконные пьезоэлектролюминесцентные (PEL) датчики [28], внедряемые (в частности, на этапе производства полимерной композитной конструкции) внутрь [26] или устанавливаемые на внешней поверхности [27] диагностируемой области для уточненного мониторинга температуры, давления и сложного объемного напряженно-деформированного состояния внутри композитных конструкций. При этом используются разработанные математические алгоритмы [28] цифровой обработки приемником-анализатором информативных интенсивностей интегральных оптических сигналов (моно- или полихромного светового потока) на выходе из оптоволоконного датчика. В оптоволоконном PEL-

датчике информативные локальные световые сигналы возникают на локальных участках электролюминесцентного слоя датчика в силу механолюминесцентного эффекта, обусловленного взаимодействием пьезоэлектрического и электролюминесцентного слоев на этом локальном участке длины датчика. Далее информативные световые электролюминесцентные сигналы проникают внутрь оптоволоконного датчика через его боковую поверхность с преобразованием световых сигналов в информативные продольные оптические волноводные моды, которые практически без потерь передаются к приемнику-анализатору на выходе из оптоволоконного датчика. Наличие в PEL-датчике управляющих электродов позволяет регулировать интенсивности светоотдачи участков (секторов) люминесцентного слоя и в целом результирующего (интегрального) светового потока на выходе из оптоволоконного датчика, в результате чего появляется возможность локации неоднородностей температурных и деформационных полей внутри композитных конструкций [28]. Отметим, что механизм проникновения внешних световых сигналов внутрь оптоволоконного датчика через его боковую поверхность с преобразованием сигналов в волноводные моды исследован и апробирован другими авторами, например, для датчиков искрения, когда регистрируемое излучение (искрение) создает в оптоволоконном датчике информативные волноводные моды в результате процесса рассеяния [29–31] или переизлучения вследствие люминесценции частиц (квантовых точек) внутри оптоволоконной оболочки вокруг оптоволоконного датчика [32–36].

При проектировании пьезоэлектрических датчиков, в том числе и оптоволоконных PEL-датчиков, необходимо учитывать многие факторы, например релаксационные процессы упругих и электрических полей в элементах структуры датчика, обусловленные их электрической проводимостью, что приводит к рассеиванию энергии, в частности, из-за тепловых потерь и светоотдачи электролюминофора. В большинстве случаев электропроводность в диэлектриках ионная, реже – электронная [37]. При постоянном электрическом напряжении проводимость диэлектрика определяется величиной сквозного тока, а при переменном – величинами сквозного тока и абсорбционных токов замедленных механизмов поляризации. Диэлектрические потери определяют как мощность электрического тока, которая рассеивается в диэлектрике в виде тепла. Физические аспекты и модели диэлектрической релаксации рассмотрены в [38], где получено и исследовано аналитическое решение нестационарной краевой задачи о релаксации электрического заряда, инжектированного в диэлектрическую пленку с учетом ее проводимости. Для структурно-неоднородных диэлектриков с поляризованными элементами структуры реализуется механизм «максвелл-вагнеровской релаксации» [39,40], который заключается в накоплении свободных зарядов на межфазных границах элементов структуры и перераспределении электрических полей при изменении частоты внешнего электрического поля [41, 42]. В решениях

задач электроупругости проводимость диэлектрика (пьезоэлектрика) γ и частота ω приложенного к нему электрического поля учитывается через комплексную запись [41,42] тензора диэлектрической проницаемости

$$\lambda = \lambda' - i\gamma / \omega \quad (1)$$

с действительной частью λ' , что приводит, например, к комплексным значениям эффективных электроупругих свойств композита [41, 42] и передаточных коэффициентов оптоволоконного PEL-датчика и, как следствие, обуславливает возникновение дисперсионных и резонансных эффектов частотных характеристик датчика, наличие энергетических потерь (рассеивание энергии) для случая диагностирования переменной механической нагрузки (давления) и/или действия переменного управляющего электрического напряжения на электродах PEL-датчика. Отметим, что решение связанной задачи электроупругости в статической постановке [26, 43] соответствует частному случаю, когда «времена релаксаций» зарядов [1, 41, 42] существенно больше периода изменения электрического поля и, как следствие, релаксационные процессы не реализуются. Глубина релаксации и ее тип, по которому реализуется «прямая» или «обратная» релаксация, например, для эффективных свойств композита [41, 42, 44], передаточных коэффициентов оптоволоконного PEL-датчика [45] определяются совокупностью структурных параметров объекта, в частности, пьезоактивностью, взаимным расположением, формой и объемными долями его неоднородностей.

Цель – выявление резонансных режимов и анализ закономерностей частотных характеристик: управляющих и информативных передаточных коэффициентов встраиваемого оптоволоконного PEL-датчика [26] для измерения неоднородного сложного объемного напряженно-деформированного состояния внутри полимерной композитной конструкции на основе численного моделирования связанных электроупругих полей представительного фрагмента электромеханической системы «композит-датчик».

1. Оптоволоконный PEL-датчик

Элементы структуры встраиваемого оптоволоконного PEL-датчика [26] сложного объемного напряженно-деформированного состояния изображены на рис. 1. Электролюминесцентный и пьезоэлектрический слой датчика разделены радиально-продольными границами на геометрически равные шесть двухслойных секторов «люминофор/пьезоэлектрик». В секторах направления поляризации пьезоэлементов и частоты светоотдач электролюминесцентных фаз различны по всем шести секторам; направления поляризации пьезоэлементов задаются из условия некомпланарности направлений поляризации для трех произвольных секторов. Буферный слой датчика необходим для механической транс-

ляции на пьезоэлементы лишь макроскопической (усредненной) составляющей быстроосциллирующего поля микронапряжений композита из окрестности датчика. Результирующие электрические напряжения $U_{\text{люм}(j)}$ на электролюминесцентных элементах в каждом j -м круговом секторе представим в виде

$$U_{\text{люм}(j)} = a_{U(j)} U_{\text{упр}} + \mathbf{a}_{\varepsilon(j)nm} \varepsilon_{nm}^*, \quad (2)$$

где $U_{\text{упр}}$ – управляющее электрическое напряжение; ε^* – искомый тензор осредненных деформаций или «макродеформаций» [46] для «макроточки» композита – представительной области композита со встроенным в ее центральную область элементарным фрагментом датчика с линейной (вдоль оси датчика) координатой $\xi = r_3$ (см. рис. 1), т.е. «макроточка» – это область, включающая в себя элементарный фрагмент оптоволоконного PEL-датчика с его локальной представительной окрестностью полимерного композитного материала (однонаправленный волокнистый стеклопластик) конструкции, $j = \overline{1, 6}$.

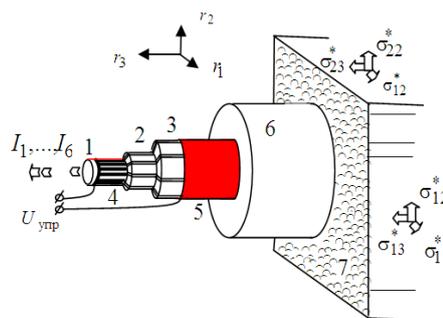


Рис. 1. Встраиваемый оптоволоконный PEL-датчик: 1 – оптоволоконно; 2 – электролюминофор; 3 – пьезоэлектрик; 4, 5 – электроды; 6 – буферный слой; 7 – полимерный композит

Fig. 1. Built-in fiber-optic PEL-sensor: 1 – optical fiber, 2 – an electrochromophore, 3 – piezoelectric, 4 and 5 – electrodes, 6 – buffer layer, 7 – polymer composite

Коэффициенты $a_{U(j)}$, $\mathbf{a}_{\varepsilon(j)}$ в (2) являются управляющими и информативными передаточными коэффициентами датчика и зависят как от физико-механических свойств его элементов, так и от эффективных упругих свойств композита, взаимной ориентации оси датчика и осей анизотропии композита. Учет электрических проводимостей (1) элементов структуры оптоволоконного PEL-датчика (см. рис. 1) обуславливает комплексный вид и дополнительную зависимость передаточных коэффициентов $a_{U(j)}$, $\mathbf{a}_{\varepsilon(j)}$ от круговой частоты ω диагностируемого тензора макродеформаций ε^* локальной области композита, например, для случая установившихся вынужденных гармонических колебаний (вибраций). Передаточные коэффициенты $a_{U(j)}$, $\mathbf{a}_{\varepsilon(j)}$ могут быть определены экспериментально или в результате математического моделирования с ис-

пользованием современных численных методов механики, например пакета конечно-элементного анализа ANSYS через вычисление электрических потенциалов в контрольных точках секторов «люминофор/пьезоэлектрик» центрального поперечного сечения датчика (рис. 2).

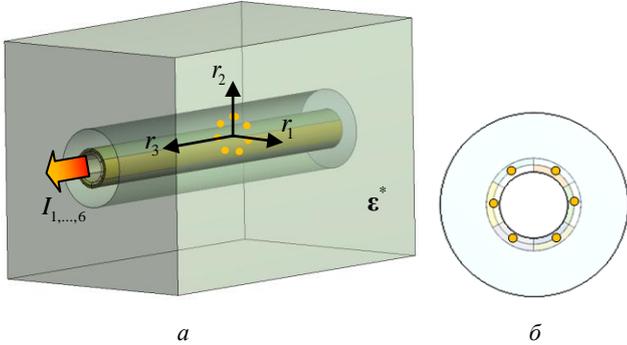


Рис. 2. Представительная область композита с PEL-датчиком (а), поперечное сечение датчика с контрольными точками (б)

Fig. 2. The representative area of the composite with PEL sensor (a), cross section of sensor with measuring points (b)

2. Гармонические поля деформирования

Рассмотрим диагностирование амплитуд $\tilde{\epsilon}^*$ осевых и сдвиговых компонент тензора макродеформаций

$$\tilde{\epsilon}^* = \tilde{\epsilon}^* e^{-i\omega t} \quad (3)$$

композитной окрестности встроенного оптоволоконного PEL-датчика (см. рис. 1) при гармонических колебаниях (вибрациях) представительной области системы «композит-датчик» (см. рис. 2) с круговой частотой ω . Круговая частота ω вибраций определяется по частоте регистрируемого светового потока на выходе из оптоволоконного PEL-датчика. Пространственное распределение амплитуд деформаций $\tilde{\epsilon}^*$ для протяженной локальной внутренней области конструкции – окрестности встроенного оптоволоконного PEL-датчика, определяется по разработанным алгоритмам цифровой обработки интенсивности измеряемого светового потока [28, 43].

Рассматриваем случай, когда на выходах электродов датчика (см. рис. 1) приложено постоянное или переменное управляющее электрическое напряжение

$$U_{\text{упр}} = \tilde{U}_{\text{упр}} e^{-i\omega t}, \quad (4)$$

когерентное диагностируемой деформации

$$\tilde{\epsilon}^* = \tilde{\epsilon}^* e^{-i\omega t}. \quad (5)$$

Результирующие значения электрических напряжений на j -х электролюминоэсцентных элементах (секторах) датчика

$$U_{\text{люм}(j)}(t) = \tilde{U}_{\text{люм}(j)} e^{-i\omega t} \quad (6)$$

с комплексными амплитудами $\tilde{U}_{\text{люм}(j)}$ представим разложениями

$$\tilde{U}_{\text{люм}(j)} = a_{U(j)} \tilde{U}_{\text{упр}} + \mathbf{a}_{\epsilon(j)nm} \tilde{\epsilon}_{nm}^* \quad (7)$$

через комплексные амплитуды искоемых деформаций $\tilde{\epsilon}^*$ и заданного управляющего электрического напряжения $\tilde{U}_{\text{упр}}$ на электродах датчика с учетом зависимостей коэффициентов $\mathbf{a}_{\epsilon(j)}$, $a_{U(j)}$ (7) от круговой частоты ω . Управляемый сдвиг фаз $\Delta_{\text{упр}(U\epsilon)}$ величин $\tilde{\epsilon}^*$, $U_{\text{упр}}$ создаем варьированием начальной фазы в комплексной амплитуде $\tilde{U}_{\text{упр}}$ управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}}$ (4). Коэффициенты $\mathbf{a}_{\epsilon(j)}$, $a_{U(j)}$ (7) определяем из решений соответствующих вспомогательных задач для «простых» случаев нагружений с учетом линейности и суперпозиции решений для электроупругих полей системы «композит-датчик». В частности, численные значения коэффициентов $\mathbf{a}_{\epsilon(j)}$ в (7)

$$U'_{\text{люм}(j)} = \tilde{U}'_{\text{люм}(j)} e^{-i\omega t} = a_{\epsilon(j)nm} \tilde{\epsilon}_{nm}^* e^{-i\omega t} \quad (8)$$

найдем из решения задачи о вынужденных колебаниях представительного фрагмента системы «композит-датчик» (см. рис. 1 и 2) с заданными единичными амплитудами простых макродеформаций – компонентами тензора $\tilde{\epsilon}^*$ для случая $\tilde{U}_{\text{упр}} = 0$. Для представительной области системы «композит-датчик» в виде параллелепипеда (рис. 2, а) тензор амплитуд макродеформаций $\tilde{\epsilon}^*$ задавался через соответствующие значения амплитуд перемещений $\tilde{u}_i^* = \tilde{\epsilon}_{ij}^* r_j^*$ точек r_j^* ее границ (граней параллелепипеда) с учетом соотношений Коши $\tilde{\epsilon}_{ij}^* = (\tilde{u}_{i,j}^* + \tilde{u}_{j,i}^*)/2$ малых деформаций. Значения коэффициентов $a_{U(j)}$ в (7) находим из решения

$$U^*_{\text{люм}(j)} = \tilde{U}^*_{\text{люм}(j)} e^{-i\omega t} = a_{U(j)} \tilde{U}^*_{\text{упр}} e^{-i\omega t} \quad (9)$$

для случая $\tilde{\epsilon}^* = 0$ фрагмента системы (см. рис. 2) при единичном значении амплитуды управляющего электрического напряжения $\tilde{U}^*_{\text{упр}} = 1\text{В}$ на электродах датчика.

3. Результаты численного моделирования

При численном моделировании оптоволоконного PEL-датчика (см. рис. 1 и 2) были использованы известные [43, 47, 48] значения электроупругих характеристик полимерного электролюминофора, пьезоэлектрика PVDF (в главных осях), полиэтилена (для буферного слоя), эффективных свойств однонаправленного волокнистого стеклопластика с объемной долей волокон 0,6 [46]. Продольная ось оптоволоконного PEL-датчика – ось r_3 , проходит через центр расчетной области в виде параллелепипеда (см. рис. 2), ребра которого ориенти-

рованы по осям $r_{1,2,3}$ со значениями длин: 16,8 мм по осям $r_{1,2}$ и 27,2 мм по оси r_3 , значения радиусов концентрических цилиндрических межфазных поверхностей датчика: $r_{(1)} = 1$ мм, $r_{(2)} = 1,2$ мм, $r_{(3)} = 1,4$ мм, $r_{(4)} = 2,8$ мм. Численное моделирование проведено с использованием многопроцессорного вычислительного комплекса Центра высокопроизводительных вычислительных систем Пермского национального исследовательского политехнического университета в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Для решения систем линейных алгебраических уравнений использован итерационный решатель метода сопряженных градиентов Jacobi Conjugate Gradient (JCG) solver, который позволил существенно сократить время счета в сравнении с решателем Sparse direct equation solver (SPARSE). Время счета для базового варианта задачи составило около 18 часов для SPARSE и 7,5 часов для JCG. На рис. 3 и 4 приведены результаты вычислений распределения численных значений полей амплитуд

осевых и сдвиговых напряжений $\tilde{\sigma}_{ij}$ по сечению расчетной области и (в уточненном формате) по сечению датчика при заданном ненулевом значении одной из шести (трех осевых и трех сдвиговых) амплитуд компонент $\tilde{\epsilon}_{ij}^*$ тензора макродеформаций $\tilde{\epsilon}^*$ представительной области (см. рис. 2) со значением круговой частоты $\omega = 600$ рад/с.

По результатам численного моделирования (3)–(7) неоднородного распределения амплитуд электроупругих полей в объеме расчетной области (см. рис. 2) и в результате нахождения численных значений электрических потенциалов в 6 контрольных (центральных) точках межфазных границ (дуг) «люминофор-пьезоэлектрик» круговых секторов датчика в плоскости срединного поперечного сечения расчетной области для «простых» случаев ее нагружения (8), (9) с круговой частотой ω были найдены частотные зависимости для передаточных коэффициентов оптоволоконного PEL-датчика (рис. 5–7).

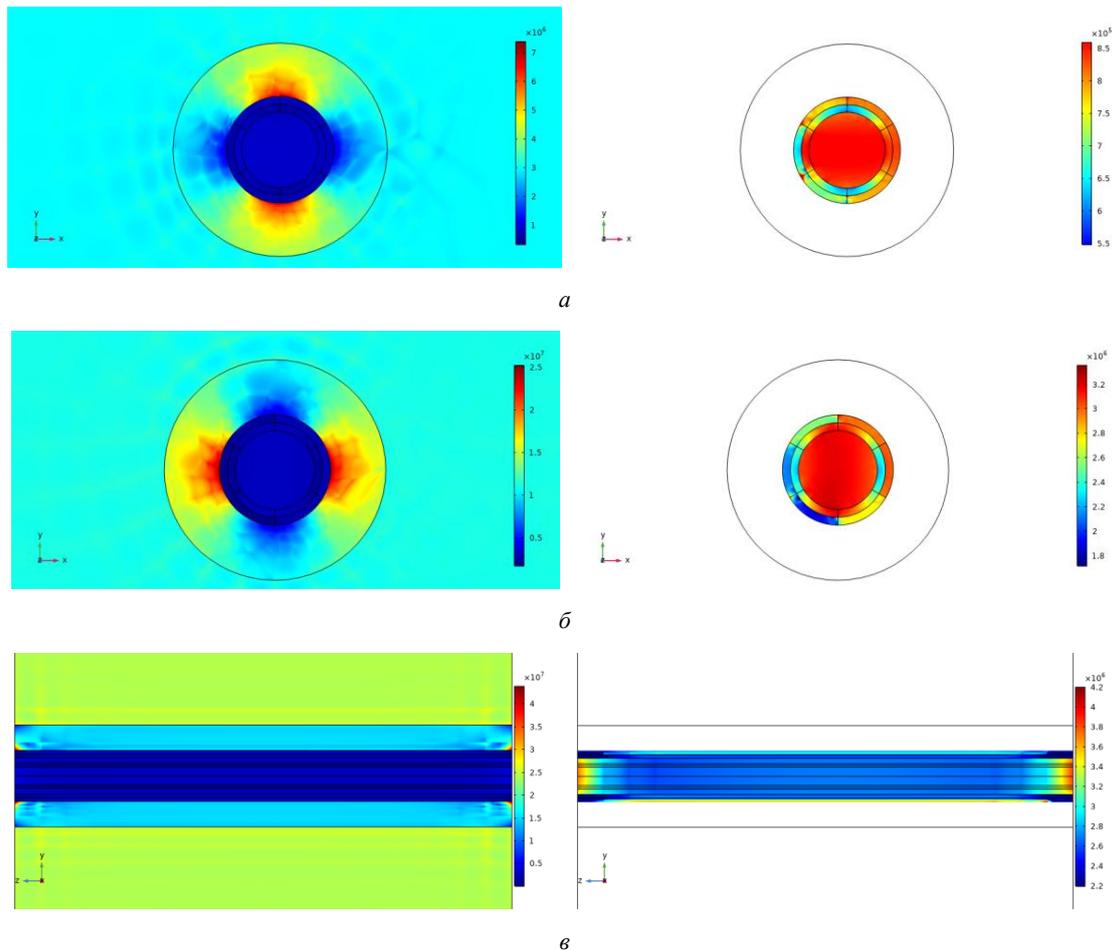


Рис. 3. Поле амплитуды нормального напряжения $\tilde{\sigma}_{11}$ в сечении r_1r_2 при осевой деформации $\tilde{\epsilon}_{11}^* = 0,01$ (а);

$\tilde{\sigma}_{22}$ в r_1r_2 при $\tilde{\epsilon}_{22}^* = 0,01$ (б); $\tilde{\sigma}_{33}$ в r_2r_3 при $\tilde{\epsilon}_{33}^* = 0,01$ (в)

Fig. 3. Field of normal stress amplitude $\tilde{\sigma}_{11}$ in section r_1r_2 at axial strain $\tilde{\epsilon}_{11}^* = 0.01$ (a), $\tilde{\sigma}_{22}$ in r_1r_2 at $\tilde{\epsilon}_{22}^* = 0.01$ (b),

$\tilde{\sigma}_{33}$ in r_2r_3 at $\tilde{\epsilon}_{33}^* = 0.01$ (c)

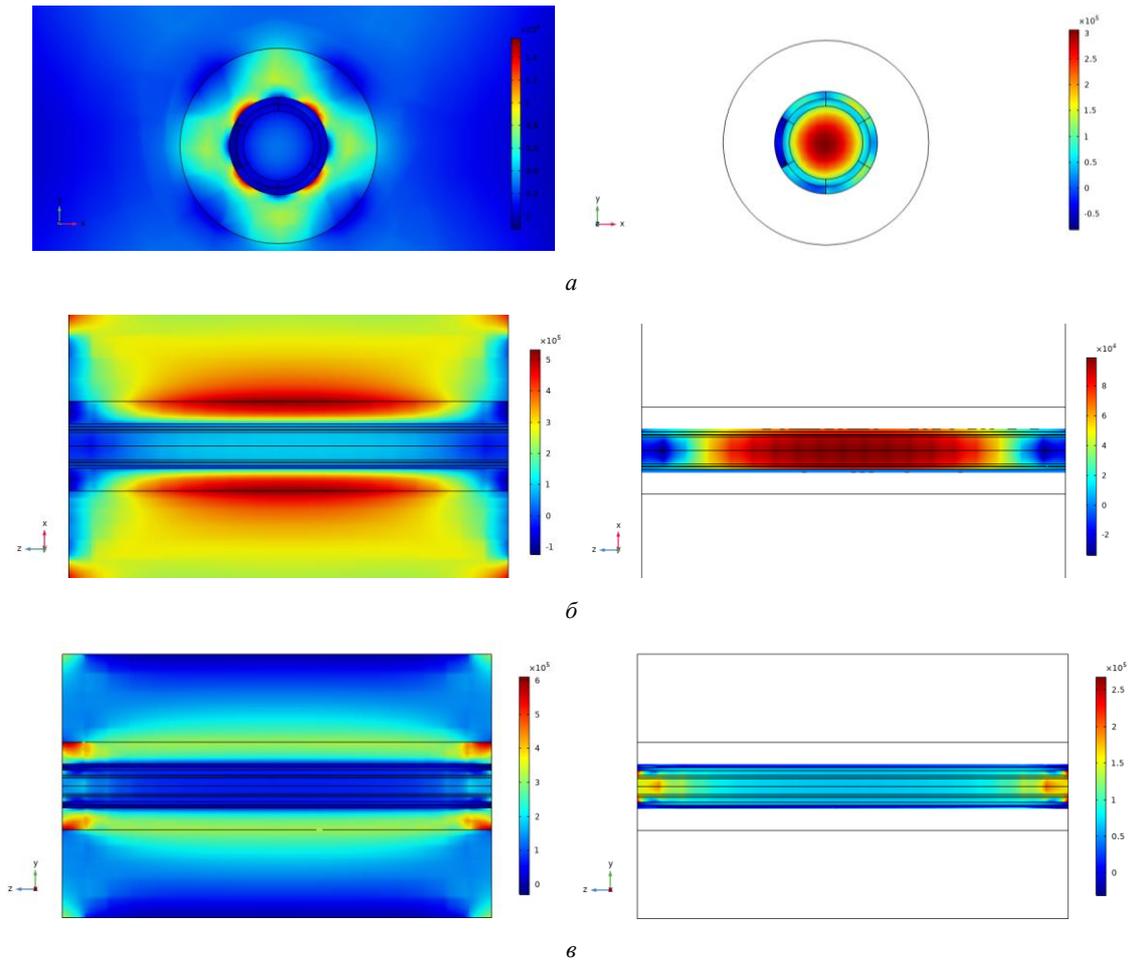


Рис. 4. Поле амплитуды касательного напряжения $\tilde{\sigma}_{12}$ в сечении r_1r_2 при сдвиговой деформации $\tilde{\epsilon}_{12}^* = 0,01$ (а); $\tilde{\sigma}_{13}$ в r_1r_3 при $\tilde{\epsilon}_{13}^* = 0,01$ (б); $\tilde{\sigma}_{23}$ в r_2r_3 при $\tilde{\epsilon}_{23}^* = 0,01$ (в)

Fig. 4. Field of amplitude of tangent stress $\tilde{\sigma}_{12}$ in section r_1r_2 at shear strain $\tilde{\epsilon}_{12}^* = 0.01$ (a), $\tilde{\sigma}_{13}$ in r_1r_3 at $\tilde{\epsilon}_{13}^* = 0.01$ (b), $\tilde{\sigma}_{23}$ in r_2r_3 at $\tilde{\epsilon}_{23}^* = 0.01$ (c)

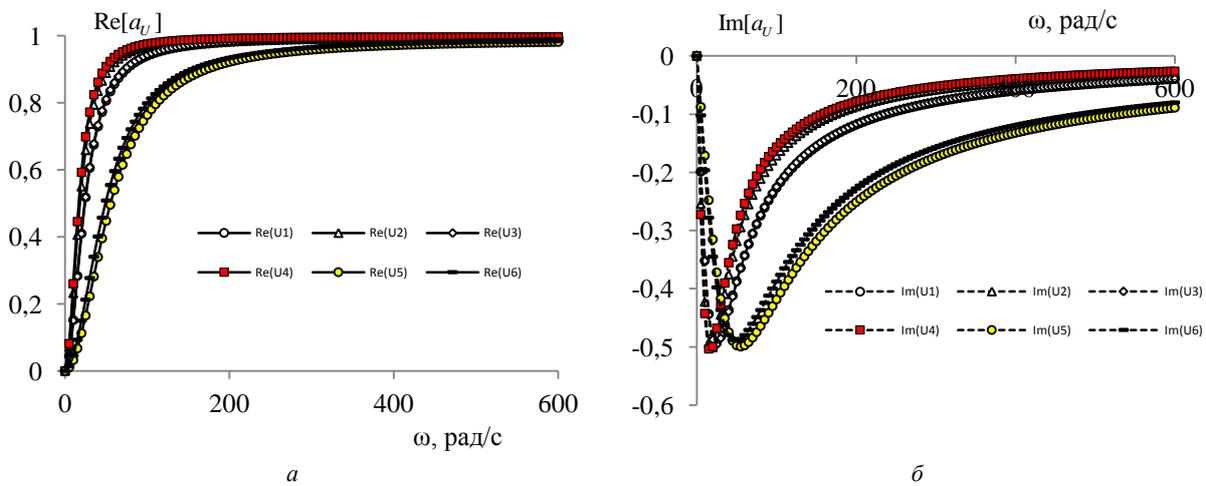


Рис. 5. Частотные зависимости действительной $\text{Re}[a_U]$ (а) и мнимой $\text{Im}[a_U]$ (б) частей управляющих передаточных коэффициентов $a_{U(j)}$

Fig. 5. Frequency dependencies of real $\text{Re}[a_U]$ (a) and imaginary $\text{Im}[a_U]$ (b) parts of control transfer coefficients $a_{U(j)}$

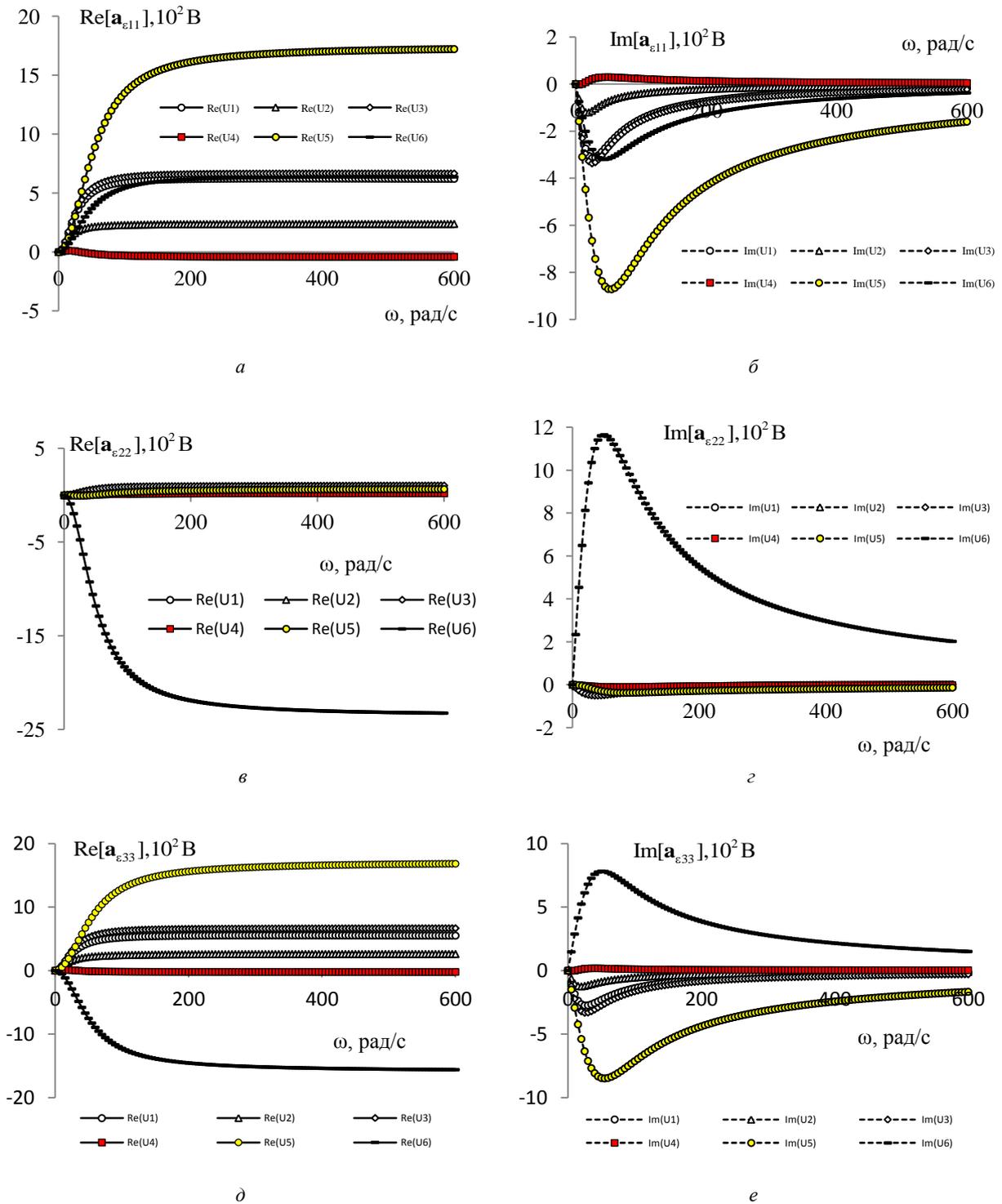


Рис. 6. Частотные зависимости действительной $Re[a_{\epsilon j}]$ и мнимой $Im[a_{\epsilon j}]$ частей «осевых» информативных передаточных коэффициентов: $a_{\epsilon 11(j)}$ (a, б); $a_{\epsilon 22(j)}$ (в, г); $a_{\epsilon 33(j)}$ (д, е)

Fig. 6. Frequency dependences of the real $Re[a_{\epsilon j}]$ and imaginary $Im[a_{\epsilon j}]$ parts of "axial" informative transfer coefficients $a_{\epsilon 11(j)}$ (a, b), $a_{\epsilon 22(j)}$ (c, d), $a_{\epsilon 33(j)}$ (e, f)

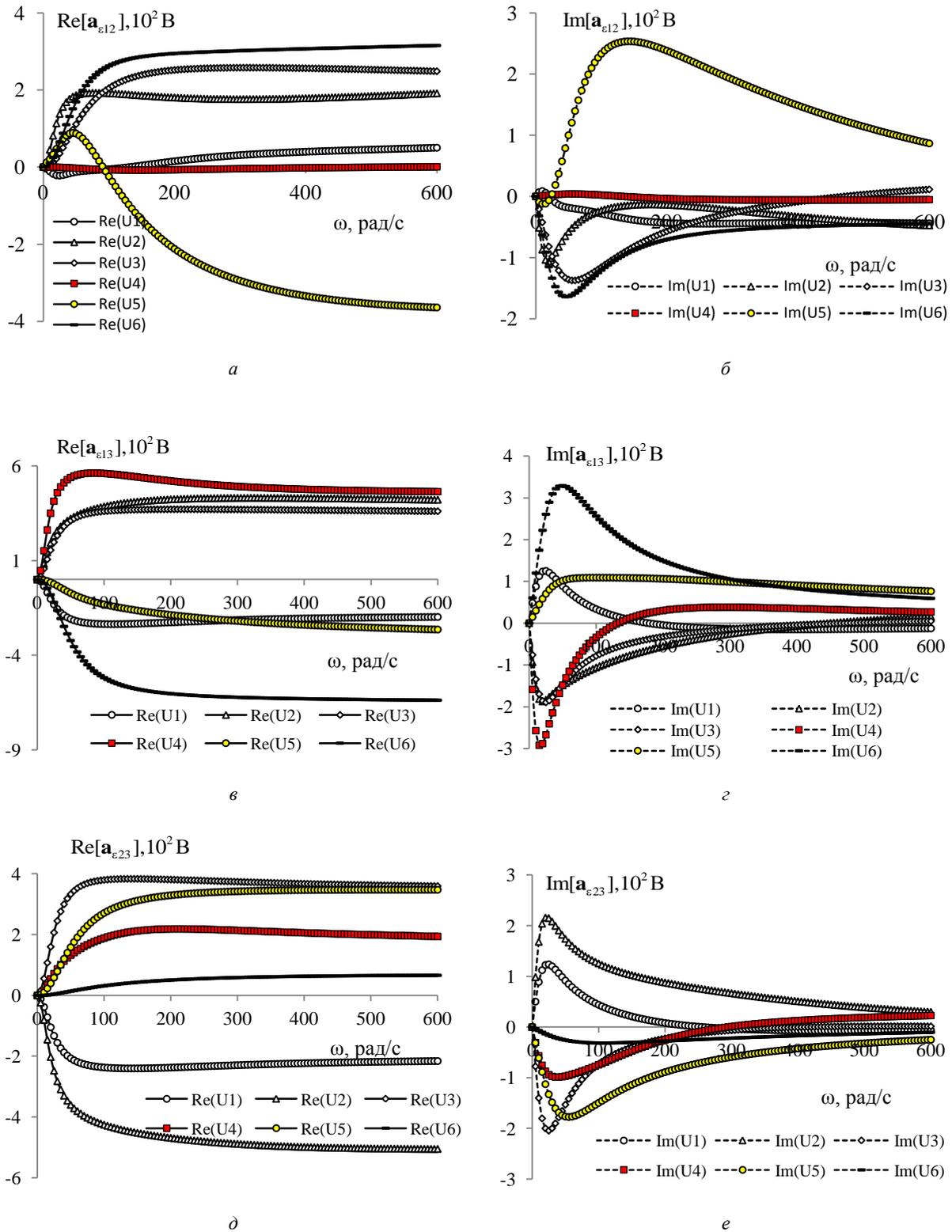


Рис. 7. Частотные зависимости действительной $\text{Re}[a_\epsilon]$ и мнимой $\text{Im}[a_\epsilon]$ частей «сдвиговых» информативных передаточных коэффициентов $a_{\epsilon 12(j)}$ (а, б); $a_{\epsilon 13(j)}$ (в, г); $a_{\epsilon 23(j)}$ (д, е)

Fig. 7. Frequency dependences of the real $\text{Re}[a_\epsilon]$ and imaginary $\text{Im}[a_\epsilon]$ parts of "shift" informative transfer coefficients $a_{\epsilon 12(j)}$ (a, b), $a_{\epsilon 13(j)}$ (c, d), $a_{\epsilon 23(j)}$ (e, f)

В частности, управляющие передаточные коэффициенты $a_{U(j)}$ найдены из решения задачи для случая заданного ненулевого значения лишь амплитуды управ-

ляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}} = 1\text{В}$ (см. рис. 5), информативные передаточные коэффициенты $a_{\epsilon_{\text{ин}}(j)}$ – из решения последовательности задач для

случаев заданных ненулевых значений лишь одной из амплитуд осевых (см. рис. 6) или сдвиговых (см. рис. 7) компонент ε_{mn}^* тензора макродеформаций. Для частотных зависимостей (см. рис. 5–7) всех компонент передаточных коэффициентов $a_{\varepsilon(j)}$, $a_{U(j)}$ (7) имеем в основном обратную релаксацию для действительных значений $\text{Re}[a_{\varepsilon(j)}]$, $\text{Re}[a_{U(j)}]$ и ярко выраженные релаксационные экстремумы для мнимых частей $\text{Im}[a_{\varepsilon(j)}]$, $\text{Im}[a_{U(j)}]$ всех секторов ($j = \overline{1,6}$) датчика за исключением частотных зависимостей $\text{Re}[a_{\varepsilon_{12}(j)}]$ при $j = 1, 2, 4, 5$ (рис. 7, а) и $\text{Re}[a_{\varepsilon_{13}(j)}]$ при $j = 1, 4$ (рис. 7, в) с наличием экстремумов – точек перехода от обратной к прямой релаксации этих коэффициентов. Для предельного случая $\omega \rightarrow \infty$ частотные зависимости действительных значений $\text{Re}[a_{\varepsilon(j)}]$, $\text{Re}[a_{U(j)}]$ (см. рис. 5–7) асимптотически приближаются к соответствующим значениям информативных коэффициентов $a_{\varepsilon(j)}$, где j – номер строки матрицы,

$$a_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} -1.1256 & 0.18152 & 0.48606 & 20.431 & -0.1758 & -0.4830 \\ -2.1181 & 10.627 & -2.6803 & 8.0761 & 3.7178 & 6.0422 \\ -13.098 & -6.6458 & 17.76 & 4.4436 & -10.470 & -13.643 \\ -6.0193 & 3.6336 & 2.4845 & -0.749 & -21.752 & 4.632 \\ -5.9911 & 19.141 & -5.7414 & 11.003 & -11.854 & -0.7165 \\ -1.2036 & 1.1229 & -0.19503 & 0.61687 & -15.288 & 9.3896 \end{bmatrix} 10^5, B$$

и значениям управляющих передаточных коэффициентов $a_U = \{1,0000, 0,99936, 1,0001, 1,0000, 1,0006, 1,0003\}$, найденным по решению соответствующих связанных задач электроупругости в статической постановке [43] без учета электрических проводимостей элементов системы «композит–датчик», при этом $\text{Im}[a_{\varepsilon(j)}] \rightarrow 0$, $\text{Im}[a_{U(j)}] \rightarrow 0$.

Для оценки демпфирующих свойств оптоволоконного PEL-датчика в системе «композит–датчик», обусловленных максвелл-вагнеровской релаксацией электрических полей в элементах датчика, осуществлен расчет (рис. 8) тангенсов углов механических потерь $\text{tg}\delta_{1,2,3}$ – отношения мнимой и действительной частей комплексного коэффициента $s_{1,2,3}^*$ эффективной упругой податливости расчетной области (см. рис. 2) при одноосных деформациях по каждому из направлений $r_{1,2,3}$, т.е. при задании лишь одного ненулевого значения амплитуды осевой деформации $\tilde{\varepsilon}_{11}^*$, или $\tilde{\varepsilon}_{22}^*$ или $\tilde{\varepsilon}_{33}^*$ соответственно.

Здесь $\delta_{1,2,3}$ – сдвиги фаз между задаваемым осевым перемещением $u_{1,2,3}^*$ грани, ортогональной оси $r_{1,2,3}$, и макроскопическим (осредненным по этой грани) значением $\sigma_{11,22,33}^*$ (и/или результирующей силы $F_{1,2,3}^* = \sigma_{11,22,33}^* S_{1,2,3}$) рассчитываемого неоднородного поля нормальных напряжений $\sigma_{11,22,33}$ на этой грани с площадью $S_{1,2,3}$ соответственно.

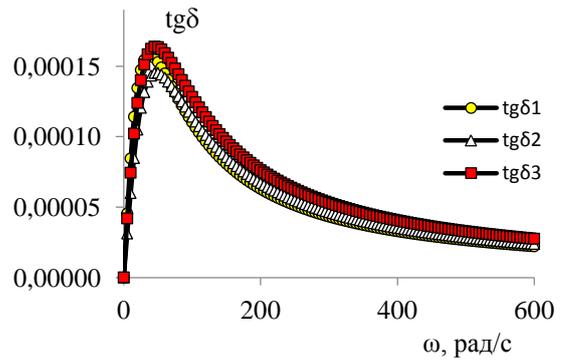


Рис. 8. Тангенс угла механических потерь $\text{tg}\delta$ при гармоническом одноосном деформировании системы «композит–датчик» вдоль осей $r_{1,2,3}$ в зависимости от частоты ω

Fig. 8. Tangent of mechanical loss angle $\text{tg}\delta$ at harmonic uniaxial deformation of "composite/sensor" system along axes $r_{1,2,3}$ depending on frequency ω

Значение управляющего электрического напряжения $U_{\text{упр}} = 0B$, что соответствует заземлению электродов датчика. В результате для рассматриваемого частотного диапазона (см. рис. 8) установлена оптимальная частота $\omega \approx 50$ рад/с вибраций системы «композит–датчик» (см. рис. 2, а), обусловленная максвелл-вагнеровской релаксацией датчика и при которой наблюдается эффективное пассивное демпфирование вибраций конструкции (композита) через преобразование в джоулево тепло и «рассеивание» подводимой к датчику механической энергии. При осевых вибрациях системы «композит–датчик» наибольшая величина демпфирования наблюдается для случая продольной вибрации (см. рис. 8).

Заключение

Рассмотрены основы функционирования электро-механической системы «композит–датчик» – оптоволоконного PEL-датчика, встроенного внутрь полимерной композитной конструкции для диагностирования переменных деформационных полей сложного неоднородного напряженного состояния протяженных внутренних областей нагруженной композитной конструкции с учетом наличия анизотропии, пьезоактивности и максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей элементов датчика. В пакете ANSYS реализовано построение пространственной численной математической модели решения связанной краевой задачи электроупругости для представительного фрагмента системы «композит–датчик», на основе которой осуществлен расчет полей распределений амплитуд связанных деформационных и электрических полей внутри представительного фрагмента и, в частности, в элементах структуры оптоволоконного PEL-датчика. Выявлены резонансные режимы и проанализированы закономерности частотных зависимостей для действительных и мнимых частей

управляющих и информативных передаточных коэффициентов и дополнительно для демпфирующих коэффициентов – тангенсов углов механических потерь для различных случаев деформирования встроенного оптоволоконного PЕL-датчика в системе «композит-датчик». Численно подтверждено, что для предельного $\omega \rightarrow \infty$ высокочастотного случая деформирования системы «композит-датчик» релаксационные процессы не реализуются и, как следствие, решения для управляющих $a_{U(j)}$ и информативных $a_{e(j)}$ передаточных коэффициентов оптоволоконного PЕL-датчика практически совпадают с ранее полученными для этих коэффициентов численными решениями без учета электрических проводимостей элементов структуры датчика. Установлен частотный диапазон деформирования системы «композит-датчик», при котором наиболее эффективно реализуется режим пассивного демпфирования вибраций через рассеивание подводимой к оптоволоконному PЕL-датчику механической энергии, что обусловлено

прямым пьезоэффектом и максвелл-вагнеровской релаксацией электрических полей в электропроводящих элементах датчика.

Благодарности

Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2020-0026).

Acknowledgments

The results were obtained during the fulfillment of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of fundamental scientific research (project No. FSNM-2020-0026).

Библиографический список

1. Вандышев Г.К., Зюрюкин Ю.А. Анализ особенностей работы пьезоэлектрического датчика давления на резистивную нагрузку // Радиотехника и электроника. – 2001. – № 3. – С. 372–376.
2. Богущ М.В., Пикалев Э.М. Анализ функции преобразования пьезоэлектрических датчиков давления методом конечных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 2 (79). – С. 74–84.
3. Вопросы синтеза и анализа метрологических моделей пьезоэлектрических датчиков быстропеременных давлений / П.Г.Михайлов, Е.А. Мокров, В.В. Скотников, Д.А. Тютюников, В.А. Петрин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 35–43.
4. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
5. Харлан А.А. Метрологическое обеспечение создания датчиков давлений для ракетно-космической техники // Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. – 2011. – Т. 1. – С. 94–96.
6. Маланин В.П., Кикот В.В. О применимости метода импедансного анализа для коррекции температурной погрешности пьезоэлектрических датчиков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 52–56.
7. Медведь А.В., Крышталь Р.Г., Богдасаров О.Е. Некоторые возможности повышения чувствительности датчиков, основанных на резонаторах на поверхностных акустических волнах // Радиотехника и электроника. – 2005. – № 6. – С. 712–720.
8. Новомейский Д.Н., Телегин А.М., Семкин Н.Д. Использование пьезодатчиков для определения места удара высокоскоростных частиц о поверхность космического аппарата // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – № 2. – С. 61–65.
9. Пат. Рос. Федерация № 2698958 RU. Сенсорная система / Паньков А.А. – № 2018145674; заявл. 21.12.2018; опубл.: 02.09.2019. – Бюл. № 25.
10. Ross R.W. Structural health monitoring and impact detection using neural networks for damage characterization // Amer-

ican Institute of Aeronautics and Astronautics. – Hampton, USA, 2006. – 11 p.

11. Регистрация космической пыли искусственного и естественного происхождения / Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, А.В. Пияков, И.В. Пияков // Прикладная физика. – 2009. – № 1. – С. 86–102.

12. Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы: сб. тр. / под ред. Л.М. Зеленого, Б.М. Шустова. – М.: ИКИ РАН, 2019. – 236 с.

13. Пат. Рос. Федерация № 2748665 RU. Способ удаления обледенения на аэродинамических поверхностях / Паньков А.А. – № 2020132202; заявл. 28.09.2020; опубл.: 28.05.2021. – Бюл. № 16.

14. 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, no. 1. – P. 87–102.

15. Моделирование и оптимизация динамических характеристик smart-структур с пьезоматериалами / В.П. Матвеевко, Е.П.Клигман, М.А. Юрлов, Н.А. Юрлова // Физическая мезомеханика. – 2012. – № 1. – С. 75–85.

16. Задача о собственных колебаниях электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями и конечно-элементные соотношения для ее численной реализации / В.П. Матвеевко, Д.А. Ошмарин, Н.В.Севодина, Н.А. Юрлова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – № 4. – С. 476–485.

17. Решение задачи о собственных колебаниях электровязкоупругих тел с внешними электрическими цепями на основе их электрического аналога / М.А. Юрлов, Д.А. Ошмарин, Н.В. Севодина, Н.А. Юрлова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 266–277.

18. Spinnability and characteristics of polyvinylidene fluoride (PVDF)-based bicomponent fibers with a carbon nanotube (CNT) modified polypropylene core for piezoelectric applications / B. Glass, W. Steinmann, S. Walter, M. Beckers, G. Seide, T. Gries, G. Roth // Materials. – 2013. – No. 6. – P. 2642–2661.

19. Use of PVDF wire sensors for leakage localization in a fluid-filled pipe / P. Sun, Y. Gao, B. Jin, M.J. Brennan // *Sensors*. – 2020. – Vol. 20(3):692. – P. 1–16.

20. Макарова Н.Ю. Тактильные сенсоры роботов на основе механолюминесцентных датчиков. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 200 с.

21. Татмышевский К.В. Научные основы расчета и проектирования механолюминесцентных чувствительных элементов датчиков импульсного давления: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2010. – 33 с.

22. Томышев К.А., Баган В.А., Астапенко В.А. Распределенные волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности // *Труды МФТИ*. – 2012. – № 2. – С. 64–72.

23. Крауя У.Э., Янсонс Я.Л. Механолюминесценция композитных материалов: методы, аппаратура и результаты исследований / Латв. АН, Ин-т механики полимеров; НИИ физики твердого тела Латв. ун-та. – Рига: Зинатне, 1990. – 152 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01001566602>

24. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites / Y. Jia, X. Tian, Z. Wu, X. Tian, J. Zhou, Y. Fang, C. Zhu // *Sensors*. – 2011. – No. 4. – P. 3962–3969.

25. Пат. 2630537 Рос. Федерация. Волоконно-оптический датчик давления / Паньков А.А. – № 2016136058; заявл. 06.09.2016; опубл. 11.09.2017. – Бюл. № 26.

26. Пат. № 2643692 Рос. Федерация. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния / Паньков А.А. – № 2017111405; заявл. от 04.04.2017; опубл.: 05.02.2018. – Бюл. № 4.

27. Пат. № 2684001 Рос. Федерация. Датчик вибраций / Паньков А.А. – № 2017137934; заявл. 30.10.2017; опубл.: 03.04.2019. – Бюл. № 10.

28. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2019. – Vol. 288. – P. 171–176.

29. Казачков Ю.П. Боковой захват оптического излучения волоконным световодом // *Письма в Журнал технической физики*. – 2008. – № 20. – С. 73–79.

30. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический распределенный позиционно чувствительный датчик электрической дуги // *Приборы и техника эксперимента*. – 2009. – № 2. – С. 145–147.

31. Казачков Ю.П. Волоконно-оптический светогенерационный распределенный датчик светового излучения // *Датчики и системы*. – 2010. – № 11. – С. 38–40.

32. Muto K. Electric-discharge sensor utilizing fluorescent optical fiber // *Journal of Lightwave Technology*. – 1989. – Vol. 7, no. 7. – P. 1029–1032.

33. Fiber optic fluorescent sensor for electric discharge detection / Lee C., Kalar K., Sallee B., Hallidy B. // *Optics InfoBase*

Conference Papers. – 2006, available at: <http://www.optics-infobase.org/conferences.cfm>

34. Агафонова Д.С., Сидоров А.И. Волоконно-оптический индикатор возникновения искры и дуги со спектральным преобразованием детектируемого излучения // *Оптическое приборостроение и технология*. – 2011. – № 11. – С. 60–65.

35. Агафонова Д.С. Разработка и исследование чувствительных элементов люминесцентных волоконно-оптических датчиков аварийных ситуаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук; С.-Петерб. гос. электротехн. ун-т «ЛЭТИ». – СПб., 2013. – 19 с.

36. Шилов А.М., Поллер Б.В. Полимерные световоды с люминофорными добавками для приемников оптического излучения // *Труды ВНКФС-9*. – Красноярск, 2003. – Ч. 2. – 614 с.

37. Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В. Электротехнические материалы: учеб. пособие / МАДИ (ГТУ). – М., 2008. – 198 с.

38. Барыбин А.А., Шаповалов В.И. Релаксация заряда в проводящих диэлектрических пленках с мелкими и глубокими ловушками // *Физика твердого тела*. – 2008. – № 5. – С. 781–793.

39. Браун В. Диэлектрики. – М.: Иностран. лит., 1961. – 328 с.

40. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Иностран. лит., 1960. – 440 с.

41. Турик А.В., Радченко Г.С. Максвелл–вагнеровская релаксация упругих констант в слоистых полярных диэлектриках // *Физика твердого тела*. – 2003. – № 6. – С. 1013–1016.

42. Турик А.В., Радченко Г.С. Гигантский пьезоэлектрический эффект в слоистых композитах сегнетоэлектрик–полимер // *Физика твердого тела*. – 2003. – № 9. – С. 1676–1679.

43. Pan'kov A.A. A piezoelectroluminescent fiber-optical sensor for diagnostics of the 3D stress state in composite structures // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – No. 2. – P. 155–164.

44. Pan'kov A.A. Maxwell–wagner relaxation in fibrous polydisperse magnetoelectric piezocomposites // *Mechanics of Composite Materials*. – 2013. – № 1. – P. 45–50.

45. 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>

46. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитных материалов. – Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1978. – 208 с.

47. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride // *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1981. – Vol. 70, no. 6. – P. 1596–1608.

48. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.

References

1. Vandyshv G.K., Zyuryukin YU.A. Analiz osobennostey raboty p'ezoelektricheskogo datchika davleniya na rezistivnyuyu nagruzku [Analysis of peculiarities of operation of piezoelectric pressure sensor on resistive load]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2001, No. 3, pp. 372–376.

2. Bogush M.V., Pikalev E.M. Analiz funktsii preobrazovaniya p'ezoelektricheskikh datchikov davleniya metodom konechnykh elementov [Analysis of the conversion function of piezoelectric pressure sensors by finite element method]. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki*, 2008, no. 2 (79), pp. 74–84.

3. Mihajlov P.G., Mokrov E.A., Skotnikov V.V., Tyutyunikov D.A., Petrin V.A. Voprosy sinteza i analiza metrologicheskikh modelej p'ezoelektricheskikh datchikov bystroperemennykh davlenij [Issues of synthesis and analysis of metrological models of piezoelectric sensors of quick-change pressures]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2014, No. 1(7), pp. 35–43.

4. Frajden Dzh. Sovremennyye datchiki. Spravochnik. [Modern sensors. Directory]. Moscow: Tekhnosfera, 2005, 592 p.

5. Harlan A.A. Metrologicheskoe obespechenie sozdaniya datchikov davlenij dlya raketno-kosmicheskoy tekhniki [Metrolog-

ical support for the creation of pressure sensors for rocket and space technology]. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma "Nadezhnost' i kachestvo"*, 2011, Vol. 1, pp. 94-96.

6. Malanin V.P., Kikot V.V. O primenimosti metoda impedansnogo analiza dlya korrektsii temperaturnoj pogreshnosti p'ezoelektricheskikh datchikov [On the applicability of the impedance analysis method for correcting the temperature error of piezoelectric sensors]. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2015, no. 2(12), pp. 52-56.

7. Medved' A.V., Kryshchal' R.G., Bogdasarov O.E. Nekotorye vozmozhnosti povysheniya chuvstvitel'nosti datchikov, osnovannykh na rezonatorakh na poverhnostnykh akusticheskikh volnakh [Some possibilities for increasing the sensitivity of sensors based on resonators on surface acoustic waves]. *Radiotekhnika i elektronika*, 2005, No. 6, pp. 712-720.

8. Novomejskij D.N., Telegin A.M., Syomkin N.D. Ispol'zovanie p'ezodatchikov dlya opredeleniya mesta udara vysokoskorostnykh chastic o poverhnost' kosmicheskogo apparata [Using piezo sensors to determine the place of impact of high-speed particles on the surface of a spacecraft]. *Fizika volnovykh processov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2015, No. 2, pp. 61-65.

9. Patent RU no.2698958. Sensornaya sistema [Sensory system] Pan'kov A.A., opubl.: 02.09.2019 Byul. no. 25.

10. Ross R.W. Structural health monitoring and impact detection using neural networks for damage characterization. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Hampton, USA, 2006, 11 p.

11. Syomkin N.D., Voronov K.E., Piyakov A.V., Piyakov I.V. Registraciya kosmicheskoy pyli iskusstvennogo i estestvennogo proiskhozhdenij [Registration of cosmic dust of artificial and natural origin]. *Prikladnaya fizika*, 2009, no. 1, pp. 86-102.

12. Kosmicheskij musor: fundamental'nye i prakticheskie aspekty ugrozy: sb. tr.[Space debris: fundamental and practical aspects of the threat: collection of works] / Pod red. L.M. Zelenogo, B.M. Shustova. Moscow: IKI RAN, 2019, 236 p.

13. Patent RU No. 2748665. Sposob udaleniya obledeneniya na aerodinamicheskikh poverhnostyakh [A way of removal of frosting on aerodynamic surfaces] / Pan'kov A.A., opubl.: 28.05.2021 Byul. No. 16.

14. 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, no. 1, pp. 87-102.

15. Matveenko V.P., Kligman E.P., YUrlov M.A., YUrlova N.A. Modelirovanie i optimizaciya dinamicheskikh harakteristik smart-struktur s p'ezomaterialami [Modeling and optimization of dynamic characteristics of smart structures with piezo materials]. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2012, no. 1, pp. 75-85.

16. Matveenko V.P., Oshmarin D.A., Sevodina N.V., YUrlova N.A. Zadacha o sobstvennykh kolebaniyakh elektrovязko-uprugih tel s vneshnimi elektricheskimi cepyami i konechno-elementnye sootnosheniya dlya ee chislennoj realizacii [The problem is about the intrinsic oscillations of electro-viscous bodies with external electric circuits and finite-element relationships for its numerical implementation]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*, 2016, no. 4, pp. 476-485.

17. YUrlov M.A., Oshmarin D.A., Sevodina N.V., YUrlova N.A. Reshenie zadachi o sobstvennykh kolebaniyakh elektrouprugih tel s vneshnimi elektricheskimi cepyami na osnove ih elektricheskogo analoga [Solving the problem of intrinsic oscillations of electrically elastic bodies with external electric circuits based on their electrical analogue]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 4, pp. 266-277.

18. Glass B., Steinmann W., Walter S., Beckers M., Seide G., Gries T., Roth G. Spinnability and characteristics of polyvinylidene fluoride (PVDF)-based bicomponent fibers with a carbon nanotube (CNT) modified polypropylene core for piezoelectric applications. *Materials*, 2013, no. 6, pp. 2642-2661.

19. Sun P., Gao Y., Jin B., Brennan M.J. Use of PVDF wire sensors for leakage localization in a fluid-filled pipe. *Sensors*, 2020, vol. 20(3):692, pp. 1-16.

20. Makarova N.YU. Taktil'nye sensory robotov na osnove mekhanoluminescentnykh datchikov [Tactile sensors of robots based on mechanoluminescent sensors]. *Izd-vo LAP Lambert Academic Publishing*, 2011, 200 p.

21. Tatmyshevskij K.V. Nauchnye osnovy rascheta i proektirovaniya mekhanoluminescentnykh chuvstvitel'nykh elementov datchikov impul'snogo davleniya [Scientific basis of calculation and design of mechanoluminescent sensitive elements of pulse pressure sensors]: avtoref. dis. ... dok. tekhn. nauk. Moscow, 2010, 33 p.

22. Tomyshev K.A., Bagan V.A., Astapenko V.A. Raspredelennyye volokonno-opticheskie datchiki davleniya dlya primeneniya v neftegazovoj promyshlennosti [Distributed fiber-optic pressure sensors for use in the oil and gas industry]. *Trudy MFTI*, 2012, no. 2, pp. 64-72.

23. Krauya U.E., YAnsons YA.L. Mekhanoluminescenciya kompozitnykh materialov: Metody, apparatura i rezul'taty issledovanij [Mechanoluminescence of composite materials: Methods, equipment and research results]. *In-t mekhaniki polimerov, NII fiziki tverdogo tela Latv. un-ta. Riga: Zinatne*, 1990, 152 p., <https://search.rsl.ru/ru/record/01001566602>

24. Jia Y., Tian X., Wu Z., Tian X., Zhou J., Fang Y., Zhu C. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites. *Sensors*, 2011, no. 4, pp. 3962-3969.

25. Patent RU No. 2630537. Volokonno-opticheskij datchik davleniya [Optic fiber-optic pressure sensor] / Pan'kov A.A., opubl. 11.09.2017 Byul. No. 26.

26. Patent RU No. 2643692. Volokonno-opticheskij datchik ob"emnogo napryazhennogo sostoyaniya [Fiber-optic volumetric stress sensor] / Pan'kov A.A., opubl.: 05.02.2018 Byul. No. 4.

27. Patent RU No. 2684001. Datchik vibracij [Vibration sensor] / Pan'kov A.A., opubl.: 03.04.2019 Byul. No. 10.

28. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 288, pp. 171-176.

29. Kazachkov YU.P. Bokovoj zahvat opticheskogo izlucheniya volokonnykh svetovodom [Lateral capture of optical radiation by a fiber light guide]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2008, no. 20, pp. 73-79.

30. Kazachkov YU.P. Volokonno-opticheskij raspredelennyj pozicionno chuvstvitel'nyj datchik elektricheskoy dugi [Fiber-optic distributed position-sensitive sensor of electric arc]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 2, pp. 145-147.

31. Kazachkov YU.P. Volokonno-opticheskij svetogeneracionnyj raspredelennyj datchik svetovogo izlucheniya [Fiber-optic light-generating distributed light radiation sensor]. *Datchiki i sistemy*, 2010, no. 11, pp. 38-40.

32. Muto K. Electric-Discharge Sensor Utilizing Fluorescent Optical Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, vol. 7, no. 7, pp. 1029-1032.

33. Lee C., Kalar K., Sallee B., Hallidy B. Fiber optic fluorescent sensor for electric discharge detection. *Optics InfoBase Conference Papers*, 2006, available at: <http://www.optics-infobase.org/conferences.cfm>

34. Agafonova D.S., Sidorov A.I. Volokonno-opticheskij indikator vznikeniya iskry i dugi so spektral'nym preobrazovaniem detektiruemogo izlucheniya [Fiber-optic indicator of spark and arc occurrence with spectral transformation of detected radiation]. *Opticheskoe priborostroenie i tekhnologiya*, 2011, no. 11, pp. 60-65.
35. Agafonova D.S. Razrabotka i issledovanie chuvstvitel'nyh elementov lyuminescentnyh volokonno-opticheskikh datchikov avarijnyh situacij / Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Development and study of sensitive elements of luminescent fibre-optic sensors of emergency situations]. S.-Peterburgskij gosudarstv. elektrotekhn. un-t «LETI», 2013, 19 p.
36. SHilov A.M., Poller B.V. Polimernye svetovody s lyuminoformnymi dobavkami dlya priemnikov opticheskogo izlucheniya [Polymer light conductors with phosphor additives for optical radiation receivers]. *Trudy VNKSF-9. Krasnoyarsk*, 2003, vol. 2, pp. 614.
37. Petrova L.G., Potapov M.A., CHudina O.V. Elektrotekhnicheskie materialy: Uchebnoe posobie [Electrical materials: Textbook]. *Moscow, MADI (GTU)*, 2008, 198 p.
38. Barybin A.A., SHapovalov V.I. Relaksaciya zaryada v provodyashchih dielektricheskikh plenkah s melkimi i glubokimi lovushkami [Charge relaxation in conductive dielectric films with small and deep traps]. *Fizika tverdogo tela*, 2008, no. 5, pp. 781-793.
39. Braun V. Dielektriki [Dielectrics]. *Moscow, Inostrannaya literatura*, 1961, 328 p.
40. Hippel' A.R. Dielektriki i volny [Dielectrics and waves]. *Moscow, Inostrannaya literatura*, 1960, 440 p.
41. Turik A.V., Radchenko G.S. Maksvell–vagnerovskaya relaksaciya uprugih konstant v sloistyh polyarnyh dielektrikah [Maxwell-Wagnerian relaxation of elastic constants in layered polar dielectrics]. *Fizika tverdogo tela*, 2003, no. 6, pp. 1013-1016.
42. Turik A.V., Radchenko G.S. Gigantskij p'ezoelektricheskij effekt v sloistyh kompozitah segnetoelektrik–polimer [Giant piezoelectric effect in layered ferroelectric-polymer composites]. *Fizika tverdogo tela*, 2003, no. 9, pp. 1676-1679.
43. Pan'kov A.A. A piezoelectroluminescent fiber-optical sensor for diagnostics of the 3D stress state in composite structures. *Mechanics of Composite Materials*, 2018, no. 2, pp. 155-164.
44. Pan'kov A.A. Maxwell-wagner relaxation in fibrous polydisperse magnetolectric piezocomposites. *Mechanics of Composite Materials*, 2013, no. 1, pp. 45-50.
45. Pan'kov A.A. Dinamicheskaya model' upravleniya rezhimom dempfirovaniya vibracij optovolokonnym PEL-datchikom s fazovym sdvigom upravlyayushchego elektricheskogo napryazheniya [Dynamic model of vibration damping mode control by optical fiber PEL-sensor with phase shift of control electric voltage]. *ZHurnal radioelektroniki [elektronnyj zhurnal]*, 2020, no. 10. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.10.3
46. Volkov S.D., Stavrov V.P. Statisticheskaya mekhanika kompozitnyh materialov [Statistical mechanics of composite materials]. *Minsk, Izd-vo Belorus. gos. un-ta*, 1978, 208 p.
47. Sessler G.M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride. *J. Acoust. Soc. Amer.*, 1981, vol. 70, no. 6, pp. 1596-1608.
48. Horoshun L.P., Maslov B.P., Leshchenko P.V. Prognozirovanie effektivnyh svojstv p'ezoaktivnyh kompozitnyh materialov [Prediction of effective properties of piezoactive composite materials]. *Kiev, Nauk. dumka*, 1989, 208 p.