

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.8>

УДК: 53.083.2; 53.082.73; 534.13

СТАТИЧЕСКИЙ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТАКТИЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ СО ВСТРОЕННЫМ ОПТОВОЛОКОННЫМ ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМ ДАТЧИКОМ

А.А. Паньков

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

Статья поступила в редакцию 11 июня 2025 г.

Аннотация. Разработана математическая электро-механическая модель функционирования тактильного полимерного покрытия в виде полимерной подложки с присоединенной к поверхности спиралью оптоволоконного пьезоэлектрOLUMИНЕСЦЕНТНОГО датчика при точечном силовом взаимодействии с исследуемым объектом. Предложен алгоритм локации внешнего одиночного воздействия. Для представительного фрагмента системы «подложка/датчик» осуществлен расчет и построение эпюр напряжений и электрических потенциалов в датчике при статическом обобщенном силовом воздействии. Представлены результаты расчета частотных зависимостей действительных и мнимых частей информативных передаточных коэффициентов, которые устанавливают функциональную связь между искомыми величинами действующих внешних одноточечных обобщенных сил и значениями возникающих электрических напряжений на электролюминесцентных элементах датчика с учетом максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей в пьезоэлектрических и электролюминесцентных элементах датчика при гармоническом обобщенном силовом воздействии. Модальный анализ

представлен найденными первыми шестью собственными частотами и формами колебаний представительного фрагмента системы «подложка/датчик». Для каждой из шести форм колебаний рассчитаны распределения по продольной координате датчика амплитуд электрических напряжений для всех шести секторов датчика; эти зависимости определяют формы световых импульсов, измеряемых на выходе из световода датчика.

Ключевые слова: пьезоэлектrolюминесценция, электроупругость, тактильное покрытие, оптоволоконный датчик, максвелл-вагнеровская релаксация, модальный анализ, численное моделирование.

Финансирование: Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2023-0006).

Автор для переписки: Паньков Андрей Анатольевич, a_a_pankov@mail.ru

Введение

В области измерительной техники задача совершенствования сенсорных индикаторных и тактильных полимерных покрытий является актуальной для локации внешних температурных и силовых сосредоточенных и/или распределенных воздействий, в том числе, диагностирования геометрических, упругих и трибологических характеристик контактирующих с покрытием тел. Гибкие полимерные сенсорные покрытия [1-3] используют в системах «ощущения» робототехнических устройств [4-9], в индикаторных полимерных покрытиях для регистрации ударных внешних воздействий [10-13]. В качестве чувствительных элементов используют различные пьезоэлектрические материалы [14,15], в частности, пьезоэлектрические пленки из полимера поливинилденфторид PVDF [16-19]. Тактильные датчики матричного типа [6,20,21] включают в себя “матрицу” – систему из ячеек элементарных микронэлектронных датчиков силы (деформации, момента), совокупная информация от которых позволяет сформировать целостное представление о форме предмета.

В [20] исследован гибкий пленочный тактильный матричный датчик на основе пленки PVDF для измерения трех составляющих пространственной контактной силы. Перспективными являются датчики [22,23] и индикаторные покрытия [24] на основе «механолюминесцентного эффекта» – светоотдачи при механическом воздействии, в частности, разрабатываемый встраиваемый оптоволоконный «шестисекторный» пьезоэлектролюминесцентный (PEL) датчик сложного напряженного состояния [23].

Цель – разработка математической электро-механической модели функционирования тактильного покрытия в виде полимерной подложки с присоединенной к поверхности спиралью оптоволоконного PEL-датчика [23] сложного напряженного состояния при силовом взаимодействии с исследуемым объектом, локация внешнего воздействия, модальный анализ и вычисление частотных зависимостей действительных и мнимых частей информативных передаточных коэффициентов (коэффициентов пропорциональности между искомыми величинами действующих внешних односточечных сил и моментов и значениями электрических напряжений на электролюминесцентных элементах датчика) с учетом максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей в пьезоэлектрических и электролюминесцентных элементах (секторах) датчика.

1. Тактильное полимерное покрытие.

Тактильное полимерное PEL-покрытие (рис. 1) представляет собой слой полимера с присоединенной к внешней поверхности непрерывной спиралью оптоволоконного PEL-датчика (рис. 2) [23]. Результирующие электрические напряжения $U_{lum(j)}$ на j -м электролюминесцентном секторе датчика (рис. 2) представляются в виде линейного разложения:

$$U_{lum(j)} = a_{F(j)k} F_k + a_{U(j)} U_{con}, \quad (1)$$

по заданным значениям управляющего электрического напряжения U_{con} и искомым компонентам F_k действующей в точке $A_{\bullet}$ обобщенной силы

$\mathbf{F} = \{P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z\}$, где $a_{U(j)}$ – управляющие и $\mathbf{a}_{F(j)} = \{a_{F(j)1}, a_{F(j)2}, \dots, a_{F(j)6}\}$ – информативные передаточные коэффициенты PEL-датчика, $j = \overline{1,6}$.

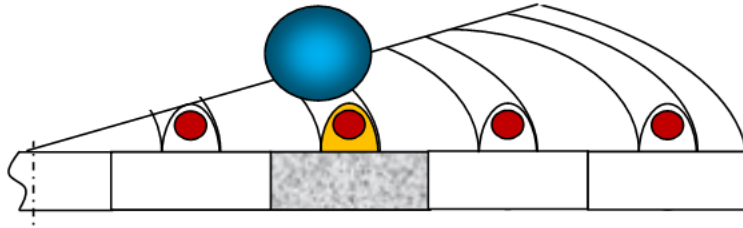


Рис. 1. Фрагмент (сектор) тактильного покрытия с внешней непрерывной спиралью оптоволоконного PEL-датчика при взаимодействии со сферическим объектом.

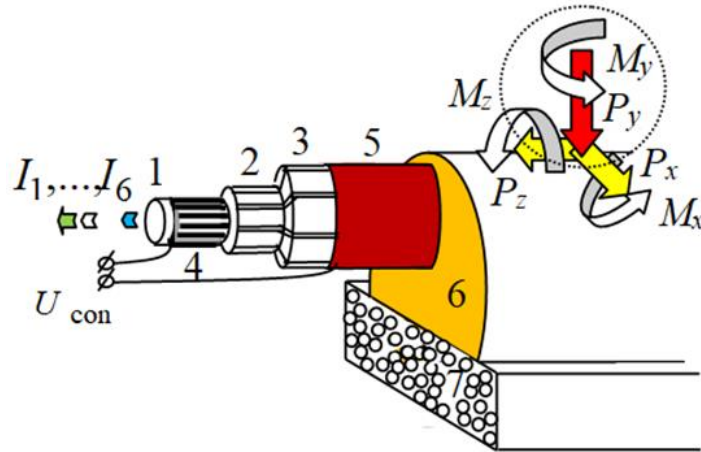


Рис. 2. Оптоволоконный PEL-датчик сложного напряженного состояния:
1 – оптоволоконно, 2 – электролюминофор, 3 – пьезоэлектрик,
4,5 – электроды, 6 – буферный слой, 7 – полимерная композитная подложка.

2. Локация одиночного воздействия.

Квазистатическое вдавливание жесткой шаровой частицы в точке $A_{\bullet}$, например, между витками спирали (рис. 3) обуславливает появление круговой «области возмущения» индикаторного покрытия, в которую входят n «дуг возмущений», генерирующих в оптоволоконном PEL-датчике световые импульсы на различных витках спирали световода. «Эпицентр» – точка $A_{\bullet}$ (рис. 3) и локальные центры – точки M, N дуг возмущений расположены на едином полярном луче. Число n дуг возмущений световода определяется значением силы P , шагом a спирали и эффективными упругими свойствами индикаторного покрытия.

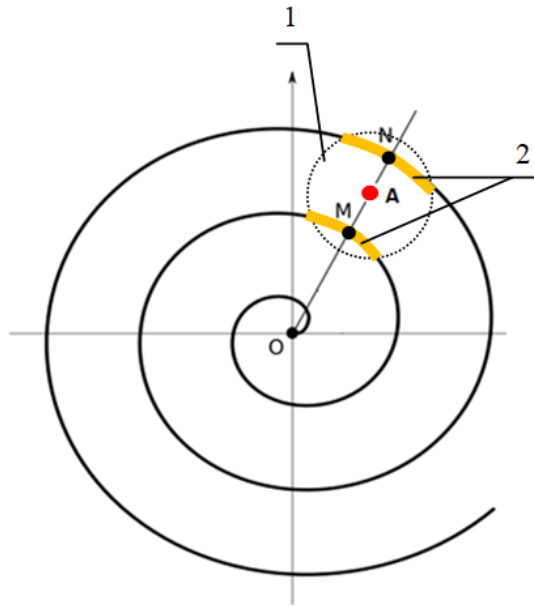


Рис. 3. Расчетная схема локации одиночного силового воздействия, где 1, 2 – зона и дуги возмущения.

Наличие $n \geq 2$ дуг возмущений по длине спирали оптоволоконного MFL-датчика обуславливает появление такого же числа n последовательных световых импульсов на выходе из оптоволоконна, где t_i – время выхода i -го импульса, $i = \overline{1, n}$ – номер импульса, $\tau_{i'} = t_{i'+1} - t_{i'}$ – временные интервалы между центрами последовательных импульсов, где $i' = \overline{1, n-1}$ – номер интервала. При этом, длина $\Delta_\bullet$ локационного витка спирали между точками M и N (рис. 3) равна длине окружности:

$$\Delta_\bullet = 2\pi\rho_\bullet, \quad (2)$$

проходящей через точку $A_\bullet$ – середину прямолинейного отрезка MN, где $\rho_\bullet$ – искомая радиальная координата точки $A_\bullet$. Локацию точки $A_\bullet$ – «эпицентра» зоны возмущения от одиночного силового воздействия P (рис.3) осуществляем через вычисление ее радиальной и угловой координат:

$$\rho_\bullet = \frac{c\tau_\bullet}{2\pi}, \quad \varphi_\bullet = \frac{c\tau_\bullet}{a}, \quad (3)$$

с использованием пропорциональной функциональной зависимости (2) по измеренному значению интервала времени $\tau_\bullet$ между двумя максимальными

по величине соседними импульсами из середины регистрируемой на выходе из световода последовательности световых импульсов, где c – скорость распространения световых импульсов в световоде, a – шаг спирали, заданной в виде функции $\rho = \frac{a}{2\pi}\varphi$ в полярной системе координат. Дополнительно к решению для локации (3) делаем оценку величины силы P внешнего воздействия по результатам измерения количества и величин наблюдаемых на выходе из световода световых импульсов.

3. Результаты численного моделирования.

3.1 Электрические и деформационные поля в PEL-датчике при статическом воздействии.

Расчетная область представительного фрагмента тактильного PEL-покрытия дана на рис. 4, с использованием которой осуществим численный расчет электрического и деформационного полей в PEL-датчике при действии одиночных единичных сил P_x , P_y , P_z , и моментов M_x , M_y , M_z в срединной верхней точке А на поверхности датчика (рис. 4). В результате численного моделирования были получены поля напряжений по Мизесу внутри датчика (рис. 5) и поля распределения электрического потенциала в поперечном и продольном центральных сечениях датчика (рис. 6) для каждого из расчетных случаев.

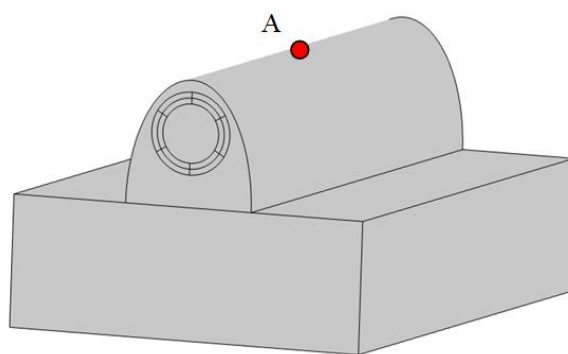


Рис. 4. Расчетная область представительного фрагмента системы «подложка/датчик» с точкой А внешнего воздействия.

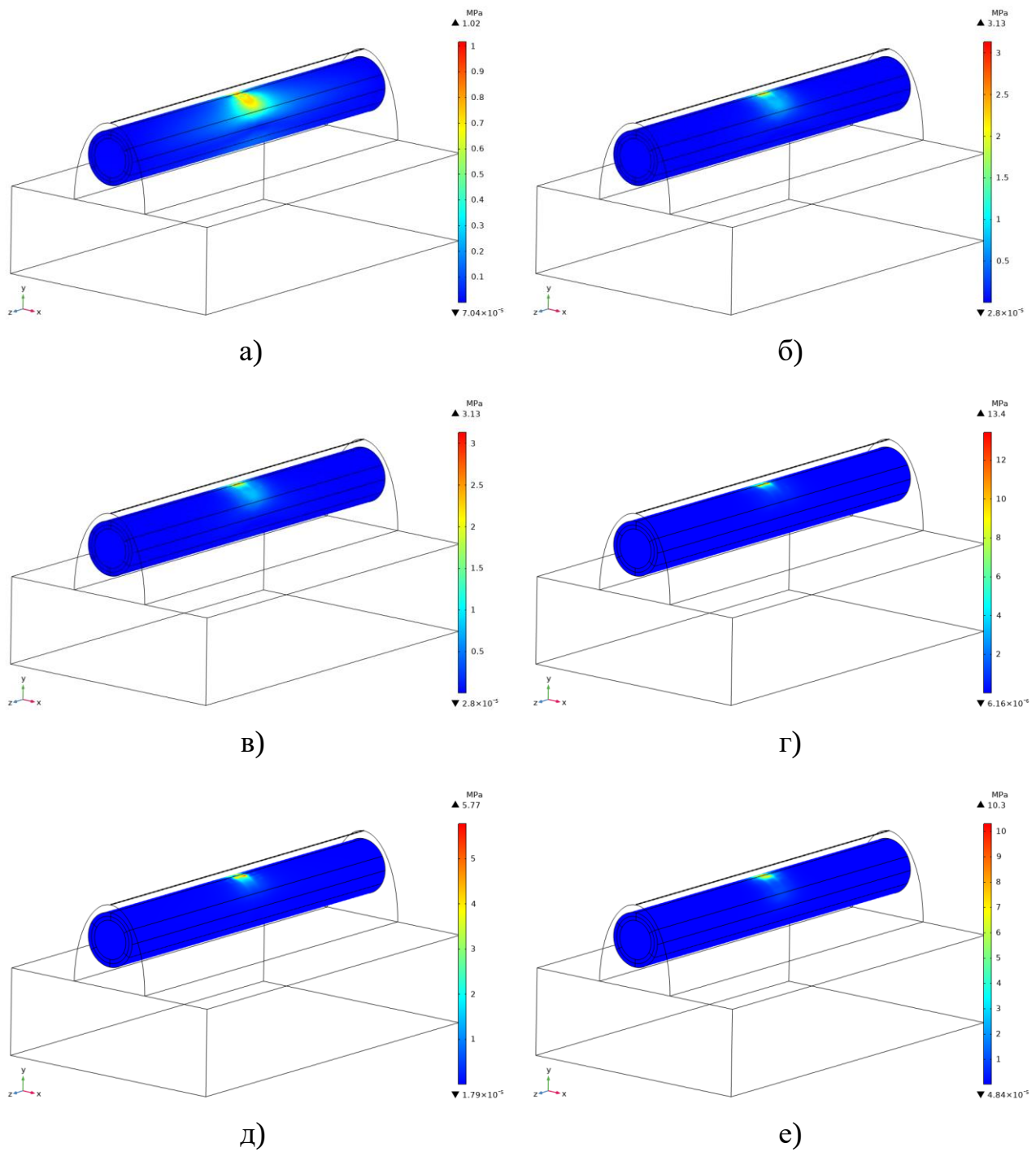


Рис. 5. Поля напряжений по Мизесу при действии силы P_x (а), P_y (б), P_z (в), момента M_x (г), M_y (д), M_z (е).

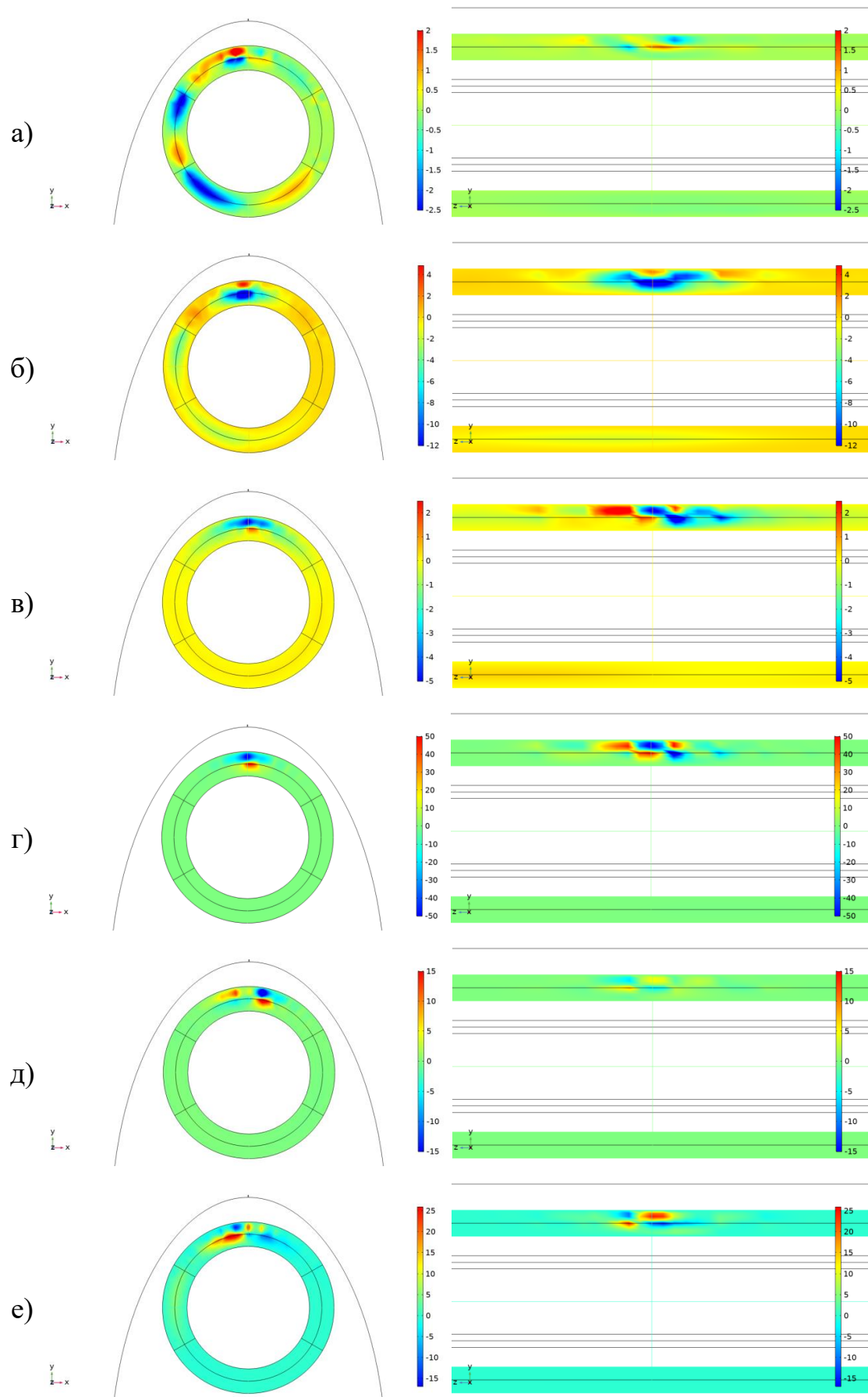


Рис. 6. Поля электрического потенциала в поперечном и продольном сечениях датчика при действии силы P_x (а), P_y (б), P_z (в), момента M_x (г), M_y (д), M_z (е).

3.2 Частотные зависимости и модальный анализ.

Максвелл-вагнеровскую релаксацию электрических полей в пьезоэлектрических и электролюминесцентных элементах (секторах) датчика осуществляем с использованием комплексной формы записи диэлектрических проницаемостей:

$$\lambda_f = \lambda_{f \text{ Re}} - i \frac{\gamma_f}{\omega},$$

где γ_f – электрические проводимости элементов, ω – круговая частота внешнего воздействия, индекс $f = 1, \dots, 12$. На рис.7 представлены графики зависимостей информативных передаточных коэффициентов от частоты электрического сигнала при действии каждой из трех единичных сил и моментов, приложенных в точке А (рис. 4). В табл. 1 представлены первые шесть резонансных частот колебаний датчика, соответствующие им формы колебаний представлены на рис. 8. На рис. 9 представлены графики распределений электрических напряжений $U_{\text{lum}(1)}, \dots, U_{\text{lum}(6)}$ по продольной оси z каждого из электролюминесцентных секторов датчика для каждой из шести форм колебаний.

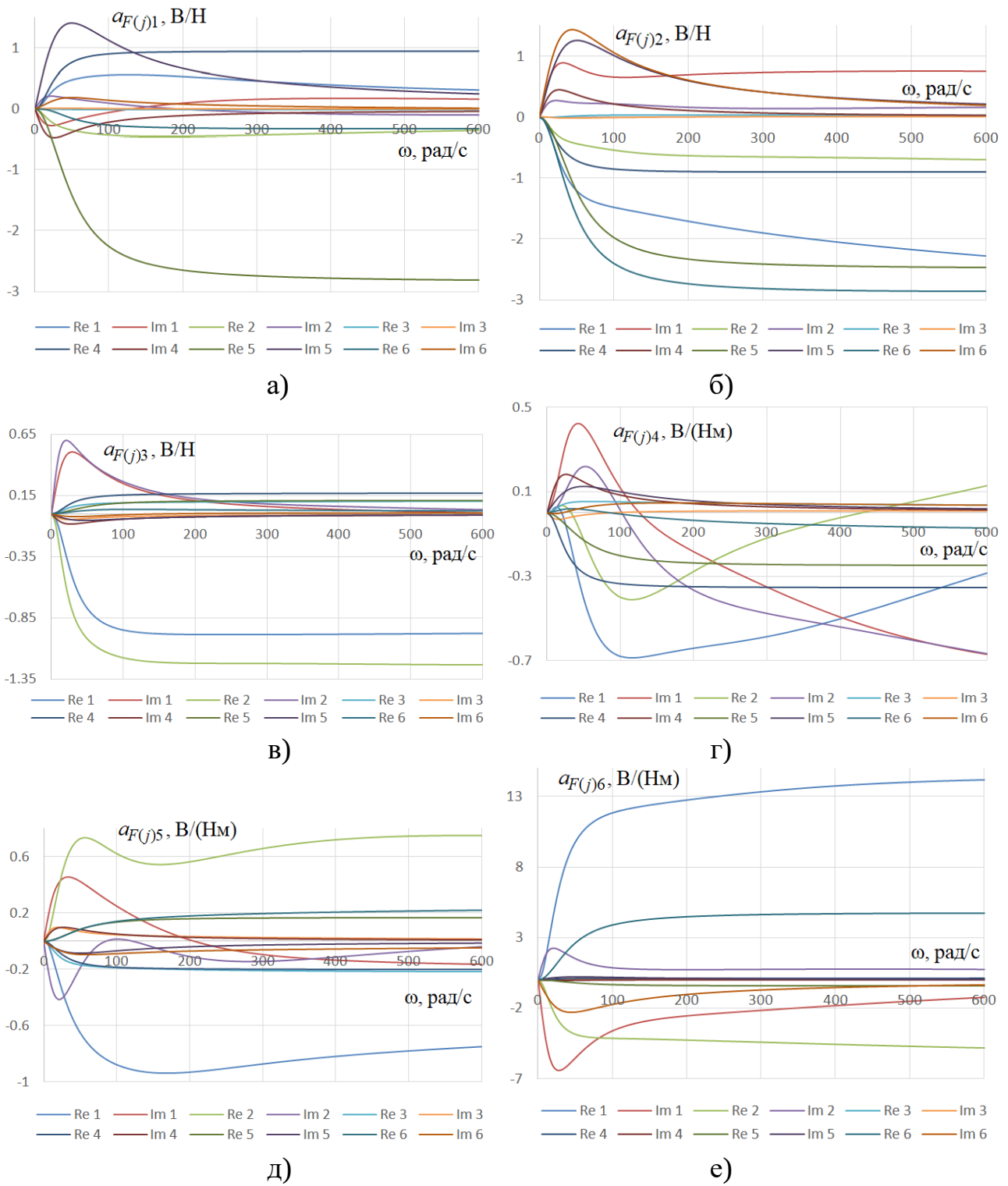


Рис.7. Зависимости действительных Re и мнимых Im частей информативных передаточных коэффициентов $a_{F(j)}$ от частоты ω действующей силы P_x (а), P_y (б), P_z (в), момента M_x (г), M_y (д), M_z (е).

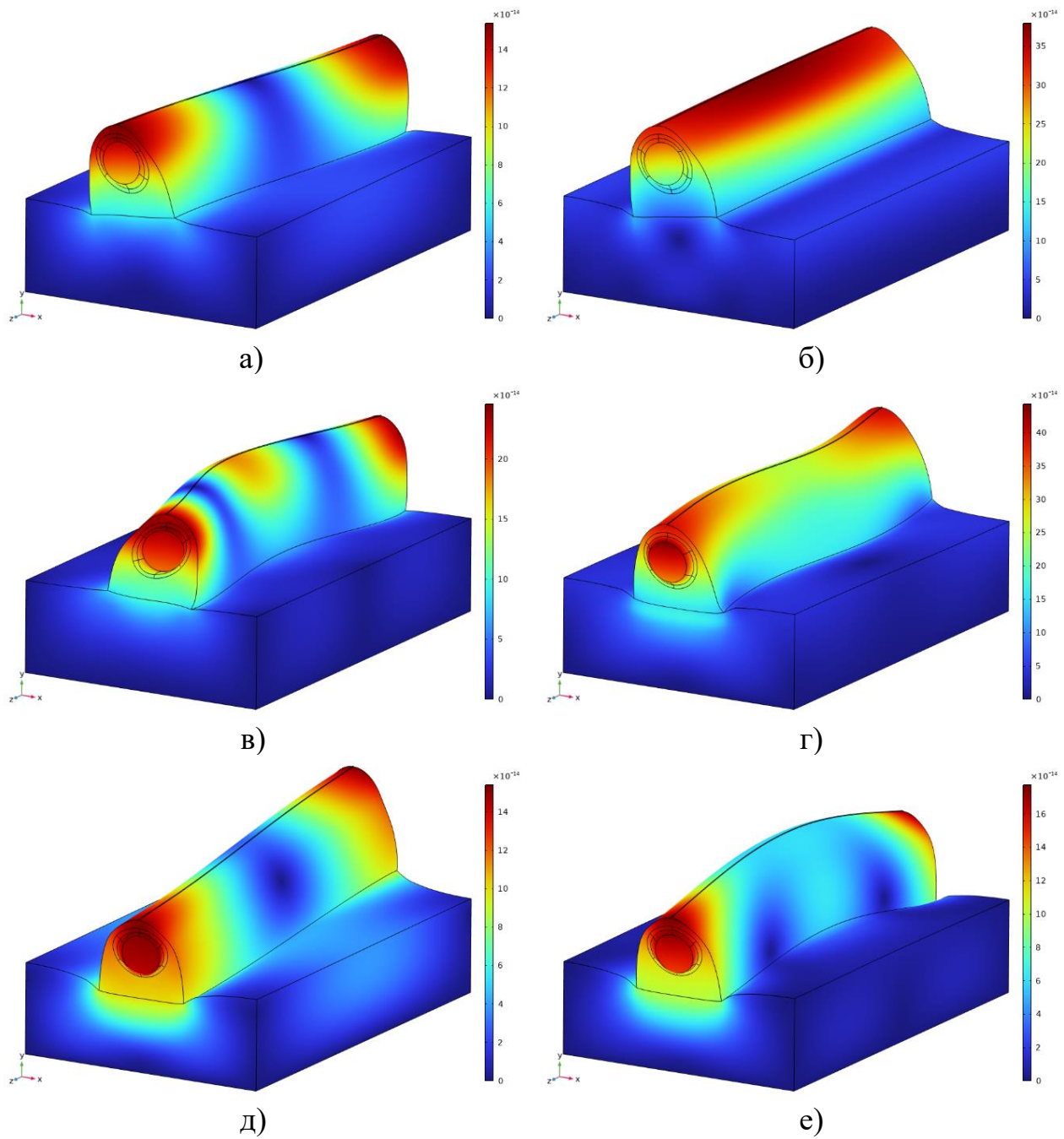


Рис. 8. Первые шесть собственных форм колебаний системы «подложка/датчик».

Таблица 1. Первые шесть собственных частот колебаний системы «подложка/датчик».

	Формы колебаний					
	1	2	3	4	5	6
Частота, Гц	69999	74938	90160	91018	106960	113220

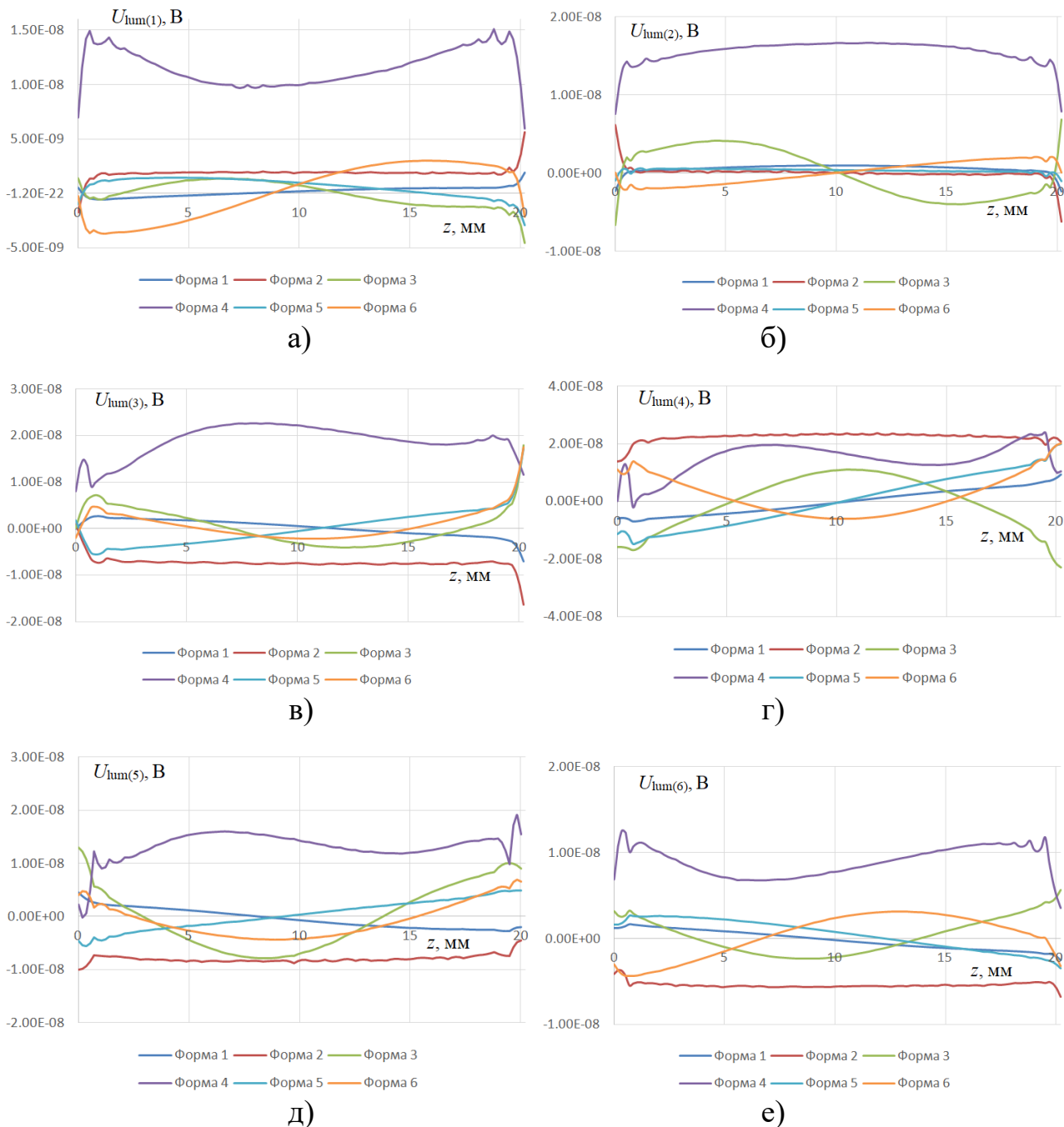


Рис. 9. Графики распределения по длине шести секторов датчика амплитуды электрического напряжения: U_{lum1} (а), U_{lum2} (б), U_{lum3} (в), U_{lum4} (г), U_{lum5} (д) и U_{lum6} (е) для первых шести форм колебаний.

Заключение

Разработана математическая электро-механическая модель функционирования тактильного полимерного покрытия (рис. 1) в виде полимерной подложки с присоединенной к поверхности спиралью оптоволоконного PEL-датчика (рис. 2) при точечном силовом взаимодействии с исследуемым объектом. Предложен алгоритм локации внешнего одиночного воздействия (рис. 3). Для представительного

фрагмента системы «подложка/датчик» (рис. 4) осуществлен расчет и построение эпюр напряжений (рис. 5) и электрических потенциалов (рис. 6) в датчике при статическом обобщенном силовом воздействии. Представлены результаты расчета частотных зависимостей (рис. 7) действительных и мнимых частей информативных передаточных коэффициентов $a_{F(j)}$ – коэффициентов пропорциональности между искомыми величинами действующих внешних односточечных сил P_x, P_y, P_z и моментов M_x, M_y, M_z , и значениями возникающих электрических напряжений: $U_{lum(1)}, \dots, U_{lum(6)}$ на каждом из шести ($j = 1, \dots, 6$) электролюминесцентных элементах датчика с учетом максвелл-вагнеровской релаксации электрических полей в пьезоэлектрических и электролюминесцентных элементах (секторах) датчика при гармоническом обобщенном силовом воздействии. Модальный анализ (рис. 8) представлен найденными первыми шестью собственными частотами и формами колебаний представительного фрагмента системы «подложка/датчик». Для каждой из шести форм колебаний на рис.9 даны графики распределений по продольной координате z датчика амплитуд электрических напряжений: $U_{lum(1)}, \dots, U_{lum(6)}$ для всех шести секторов датчика; эти зависимости $U_{lum(j)}(z)$ определяют формы световых импульсов, измеряемых на выходе из световода датчика.

Финансирование: Результаты получены при выполнении государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2023-0006).

Литература

1. Wang X., Sun F., Yin G., Wang Y., Liu B., Dong M. Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: a review. *Sensors*. 2018. V. 18. № 2. P. 1-16. <https://doi.org/10.3390/s18020330>
2. Lu K., Huang W., Guo J., et al. Ultra-sensitive strain sensor based on flexible poly(vinylidene fluoride) piezoelectric film. *Nanoscale Research Letters*. 2018. V. 13. № 83. P. 1-6. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2492-7>

3. Koiva R., Zenker M., Schurmann C., Haschke R., Ritter H.J. A highly sensitive 3D-shaped tactile sensor. *Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Wollongong, Australia. 9-12 July 2013. P.1084-1089. <https://doi.org/10.1109/AIM.2013.6584238>
4. Yousef H., Boukallel M., Althoefer K. Tactile sensing for dexterous in-hand manipulation in robotics - A review. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2011. V. 167. P. 171-187. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.02.038>
5. Kappasov Z., Corrales J.-A., Perdereau V. Tactile sensing in dexterous robot hands - Review. *Robotics and Autonomous Systems*. 2015. V. 74. P. 195-220. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.07.015>
6. Oddo C.M., Beccai L., Felder M., Giovacchini F., Carrozza M.C. Artificial roughness encoding with a bio-inspired MEMS-based tactile sensor array. *Sensors*. 2009. V. 9. № 5. P. 3161-3183. <https://doi.org/10.3390/s90503161>
7. Kolesar Jr E.S., Dyson C.S. Object imaging with a piezoelectric robotic tactile sensor. *IEEE Journal of Micro-electromechanical Systems*. 1995. V. 4. № 2. P. 87-96. <https://doi.org/10.1109/NAECON.1993.290890>
8. Drimus A., Petersen M.B., Bilberg A. Object texture recognition by dynamic tactile sensing using active exploration. *Proceedings of the 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Paris, France. 9-13 September 2012. P. 277-283.
9. Zhang T., Liu H., Jiang L., Fan S., Yang J. Development of a flexible 3-D tactile sensor system for anthropomorphic artificial hand. *IEEE Sensors Journal*. 2013. V. 13. P. 510-518.
10. Lee H.-K., Chung J., Chang S.-I., Yoon E. Normal and shear force measurement using a flexible polymer tactile sensor with embedded multiple capacitors. *IEEE Journal of Micro-electromechanical Systems*. 2008. V. 17. № 4. P. 934-942. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2008.921727>

11. Liang G., Wang Y., Mei D., Xi K., Chen Z. Flexible capacitive tactile sensor array with truncated pyramids as dielectric layer for Three-Axis force measurement. *IEEE Journal of Micro-electromechanical Systems*. 2015. V. 24. № 5. P. 1510-1519. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2418095>
12. Iwasaki T., Takeshita T., Arinaga Y., Uemura K., Ando H., Takeuchi S., Furue M., Higurashi E., Sawada R. Shearing force measurement device with a built-in integrated micro displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2015. V. 221. P. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.029>
13. Lee H.-K., Chang S.-I., Yoon E. A flexible polymer tactile sensor: Fabrication and modular expandability for large area deployment. *IEEE Journal of Micro-electromechanical Systems*. 2006. V. 15. № 6. P. 1681-1686. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2006.886021>
14. Ramadan K., Sameoto D., Evoy S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. *Smart Materials and Structures*. 2014. V. 23. № 3. P. 033001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/3/033001>
15. Seminara L., Pinna L., Valle M., Basiricò L., Loi A., Cosseddu P., Bonfiglio A., Ascia A., Biso M., Ansaldo A. Piezoelectric polymer transducer arrays for flexible tactile sensors. *IEEE Sensors Journal*. 2013. V. 13. № 10. P. 4022-4029. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2013.2268690>
16. Hamdi O., Mighri F., Rodrigue D. Piezoelectric cellular polymer films: Fabrication, properties and applications (Review). *AIMS Materials Science*. 2018. V. 5. № 5. P. 845-869. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2018.5.845>
17. Aleksandrova M. Spray deposition of piezoelectric polymer on plastic substrate for vibrational harvesting and force sensing applications. *AIMS Materials Science*. 2018. V. 5. № 6. P. 1214-1222. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2018.6.1214>
18. Rajala S., Tuukkanen S., Halttunen J. Characteristics of piezoelectric polymer film sensors with solution-processable graphene-based electrode materials. *IEEE Sensors Journal*. 2015. V. 15. № 6. P. 3102-3109. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2344132>

19. Dahiya R.S., Valle M., Lorenzelli L. SPICE model for lossy piezoelectric polymers. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*. 2009. V. 56. № 6. P. 387-395. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2009.1048>
20. Yu P., Liu W., Gu C., Cheng X., Fu X. Flexible piezoelectric tactile sensor array for dynamic three-axis force measurement. *Sensors*. 2016. V. 16. № 6. P. 1-15. <https://doi.org/10.3390/s16060819>
21. Zhang J., Zhou L.J., Zhang H.M., et al. Highly sensitive flexible three-axis tactile sensors based on the interface contact resistance of microstructured graphene. *Nanoscale*. 2018. V. 10. № 16. P. 7387-7395. <https://doi.org/10.1039/c7nr09149d>
22. Патент РФ № 2630537. Паньков А.А. Волоконно-оптический датчик давления. Дата заявки: 06.09.2016. Дата публикации: 11.09.2017.
23. Патент РФ № 2643692. Паньков А.А. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния. Дата заявки: 04.04.2017. Дата публикации: 05.02.2018.
24. Pan'kov A.A. Indicator polymer coating with built-in fiber optic piezosensor. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1029. P. 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/01207>

Для цитирования:

Паньков А.А. Статический и динамический анализ электроупругих характеристик тактильного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным датчиком. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.8>