

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.3>

УДК: 53.083.2; 53.082.73; 534.13

## ЭЛЕКТРО-МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТАКТИЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО ПОКРЫТИЯ

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

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

Статья поступила в редакцию 7 июня 2022 г.

**Аннотация.** Разработана электро-механическая модель функционирования тактильного полимерного покрытия со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным (PEL) датчиком и множеством ворсинок (вибрисс) на поверхности покрытия вдоль датчика. Локальное деформирование покрытия и встроенного в него датчика осуществляется в зонах возмущений – локальных областях покрытия (датчика) вблизи мест консольных креплений ворсинок при их контактах с анализируемым объектом. Механолюминесцентный эффект возникает на деформированных участках датчика при воздействии электрического поля участка его пьезоэлектрического слоя на смежный участок электролюминесцентного слоя. Осуществлены моделирование и анализ возникающих в пьезоэлектрическом и электролюминесцентном слоях датчика существенно неоднородных деформационных и электрических полей, выявлены характерные формы генерируемых информативных световых сигналов для различных случаев деформирования ворсинок - изгибов в различных плоскостях и кручения в результате контакта торцов ворсинок с поверхностью анализируемого объекта.

**Ключевые слова:** тактильное покрытие, ворсинки, встроенный оптоволоконный датчик, механолюминесцентный эффект, пьезоупругость, численное моделирование.

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

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

## Введение

В области измерительной техники актуальной остается задача совершенствования сенсорных индикаторных и тактильных покрытий (систем) для индикации, локации внешних воздействий (удара), 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) [16-18]. В [19] представлено исследование эквивалентной электромеханической модели для пьезоэлектрического полимера с потерями PVDF. Тактильные датчики матричного типа [6, 20, 21] включают в себя «матрицу» - систему из ячеек элементарных микроэлектронных 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. Некоторые индикаторные полимерные покрытия, включают в себя внутренний тензоэлектрочувствительный графитизированный слой и внешний «цветовой» индикаторный слой из жидкокристаллического полимера, который изменяет свой цвет в зависимости от величины проходящего через него тока. Сенсорная

пьезоэлектрическая система [22] с сетью из линейных пьезоэлементов различных поляризаций, которые связаны между собой локальными процессорами для включения/выключения ячеек из сети, позволяет системе автоматически адаптироваться к условиям эксплуатации и локализовать вероятностное расположение диагностируемого внешнего воздействия, например удара, повреждения. Тактильная сенсорная система [23] основана на «расшифровке» информативных изображений высокоскоростной фотовидеорегистрации деформирования системы дискретных тактильных упругих элементов типа «ворсинок» с обратной стороны прозрачного корпуса. Перспективными являются датчики [24-28] и индикаторные покрытия [29-31] на основе «механолюминесцентного эффекта» – светоотдачи при механическом воздействии, который может проявляться как для однородных, так и композиционных с пьезоэлектрической и электролюминесцентной фазами [32, 33] материалов.

Цель – разработка электро-механической модели функционирования тактильного полимерного покрытия [29, 30] со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным (PEL) датчиком [25] при контактном взаимодействии ворсинок покрытия с поверхностью анализируемого объекта.

## **1. Строение и функционирование тактильного покрытия**

PEL-датчик (рис. 1а) представляет собой оптоволоконно 1 с коаксиальными электролюминесцентным 2 и пьезоэлектрическим 3 слоями (оболочками); оптоволоконно и электролюминесцентный слой разделены внутренним светопрозрачным управляющим электродом 4, на поверхности пьезоэлектрического слоя 3 расположен внешний управляющий электрод 5, при этом пьезоэлектрический слой 3 имеет радиальную поляризацию. Управляющие электроды 4, 5 образуют «двухпроводную» электрическую линию, протяженную вдоль оси PEL-датчика. PEL-датчик встроен внутрь корпуса 6 - однородного полимерного слоя таким образом, что датчик проходит через локальные (деформируемые при нагружении ворсинок) области корпуса - окрестности мест консольного закрепления ворсинок 7 (рис.1,б); считаем, что локальные

продольные оси ворсинок 7 проецируются в равноудаленные точки на продольной оси датчика. В результате контактного (тактильного) взаимодействия ворсинок 7 с поверхностью анализируемого объекта 8 ворсинки деформируются, при этом ворсинки деформируют локальные области

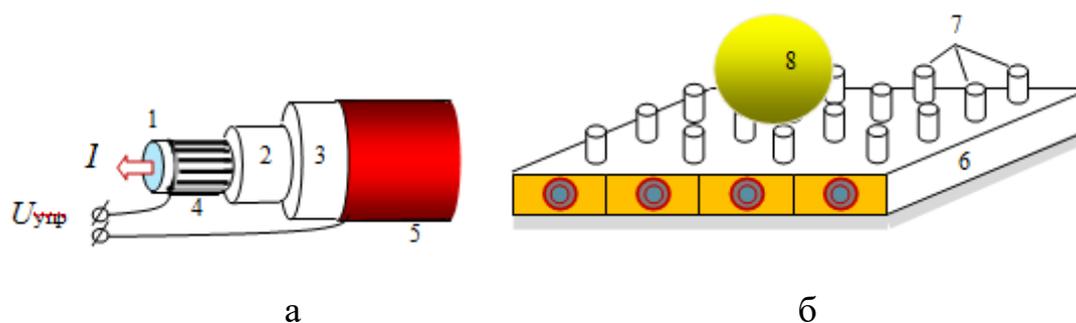


Рис. 1. Оптоволоконный PEL-датчик (а), встроенный в тактильное покрытие (б), 1 – оптоволокно, 2 – электролюминофор, 3 – пьезоэлектрик, 4, 5 – управляющие электроды, 6 – полимерный корпус, 7 – ворсинки, 8 - анализируемый объект

полимерного корпуса 6 и элементов, в частности, пьезоэлектрического слоя встроенного в корпус датчика в окрестностях мест консольного закрепления ворсинок. Возникающие на локальных участках пьезоэлектрического слоя 3 датчика информативные электрические поля, обусловленные прямым пьезоэлектрическим эффектом, воздействуют на смежный с ним электролюминесцентный слой 2, вызывая его информативное свечение с учетом приложенного на выходах электродов 4, 5 управляющего электрического напряжения  $U_{упр}$  датчика. Информативные световые сигналы проникают через светопрозрачный электрод 4 внутрь оптического волокна 1 и распространяются по нему к приемнику-анализатору интенсивности световых сигналов на выходе из оптического волокна датчика. Выводы о контактируемой поверхности анализируемого объекта делаются в результате цифровой обработки интенсивности  $I$  результирующего светового потока на выходе из оптоволоконна датчика с использованием считающихся известными базисных функций распределений электрического напряжения  $U_{люм}$  вдоль электролюминесцентного слоя при простых случаях нагружений силами  $F_x, F_y$

$F_z$  и моментами  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  одиночной ворсинки. Здесь использована декартова система координат, в которой оси  $x$ ,  $z$  ориентированы по продольным осям оптоволоконного PЕL-датчика и ворсинки соответственно.

## 2. Компьютерная модель и результаты численного моделирования

Расчетная область представительной элементарной ячейки (фрагмента) тактильного покрытия представлена на рис. 2. Ставилась задача поиска и анализа возникающих упругих и электрических полей - решений связанной краевой задачи электроупругости для области элементарной ячейки

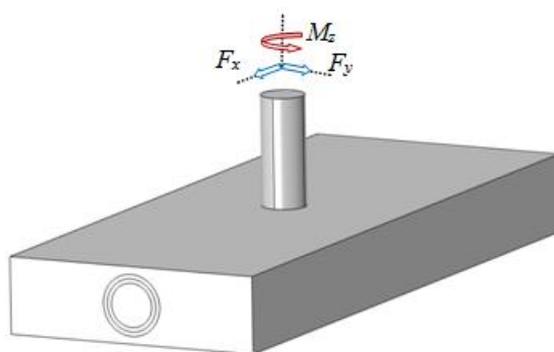


Рис. 2. Расчетная область и схема нагружения ворсинки элементарной ячейки тактильного покрытия

тактильного покрытия (рис.2) при различных случаях нагружений торцевого сечения ворсинки изгибающими поперечными силами  $F_x$ ,  $F_y$  и крутящим моментом  $M_z$ . Для структурных элементов ячейки тактильного покрытия (рис. 2) были заданы значения электроупругих свойств кварцевого оптоволоконного, полимерного электролюминофора, пьезоэлектрика PVDF с радиальной поляризацией и силиконового корпуса. Значения характерных размеров корпуса: длина 30 мм, ширина 12 мм, толщина 3.5 мм, радиусы концентрических цилиндрических межфазных поверхностей датчика: 1мм, 1.2мм, 1.4мм. Рассматривали случай без действия управляющего электрического напряжения на электроды датчика, т.е. при  $U_{упр} = 0$  (рис. 1). Жесткая ворсинка в виде цилиндрического стержня (консоли) имела длину 5мм и радиус 1мм кругового поперечного сечения. Изгибающие поперечные силы  $F_x$ ,  $F_y$  (рис. 2)

вычислялись через заданные значения прогибов  $u_{x0} = 0.1$  мм,  $u_{y0} = 0.1$  мм в плоскостях  $xz$ ,  $yz$  на свободном конце ворсинки соответственно. Крутящий момент  $M_z$  вычислялся через заданный угол поворота  $\varphi_z = 0.017$  рад торца ворсинки. При численном решении связанной стационарной краевой задачи электроупругости для области представительной ячейки (рис. 2) использован многопроцессорный вычислительный комплекс 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.

Результаты численного моделирования упругих и электрических полей даны на рис. 3 – рис. 5, в частности, на рис. 3 представлены иллюстрации поля напряжений по Мизесу  $\sigma_{Mises}$  на внешней цилиндрической поверхности встроенного в тактильное покрытие оптоволоконного PEL-датчика, на рис. 4 - поля электрического потенциала  $\varphi$  в пьезоэлектрическом и электролюминесцентном цилиндрических слоях в поперечном (центральном) и продольном сечениях датчика, на рис. 5 - графики распределений (осредненного по окружной координате) электрического напряжения  $U_{люм}$  по длине электролюминесцентного слоя датчика для рассматриваемых трех различных случаев нагружений торца ворсинки изгибающими поперечными силами  $F_x$ ,  $F_y$  и крутящим моментом  $M_z$  (рис.2 ). На рис. 5б в сравнении даны графики распределений электрического напряжения  $U_{люм}$  при различных знаках поперечной силы  $\pm F_y$ , где подтверждено, что смена знака (направления) нагрузки (рис. 2) на ворсинку, например, при изгибе в плоскости  $xz$  поперечной

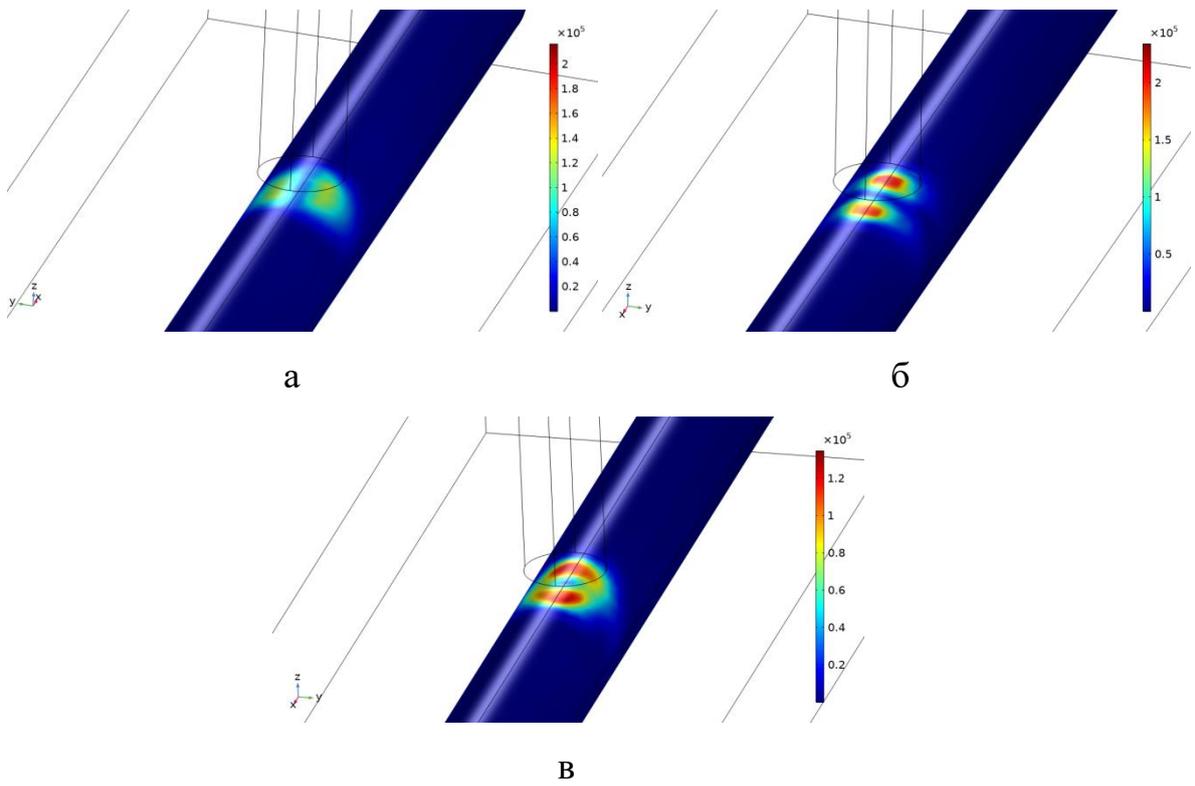
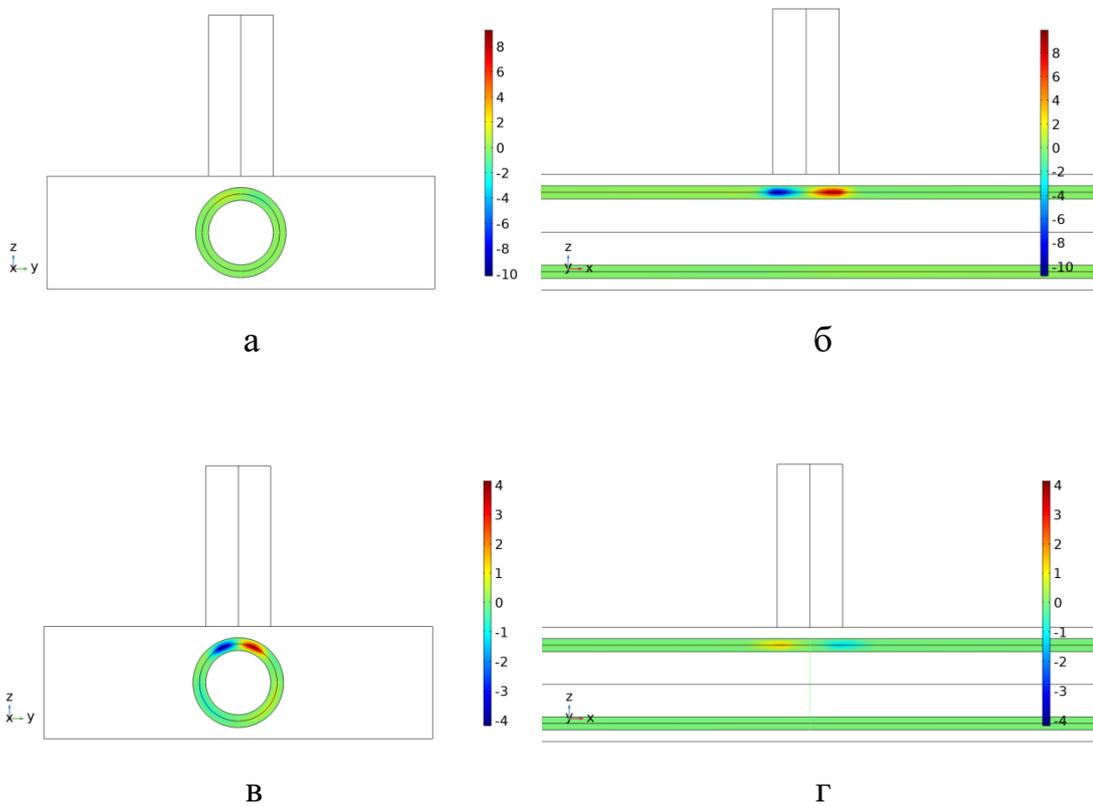


Рис. 3. Поля напряжений по Мизесу  $\sigma_{Mises}$ , Па на поверхности датчика при действии на ворсинку изгибающей поперечной силы  $F_x$  (а),  $F_y$  (б), крутящего момента  $M_z$  (в)



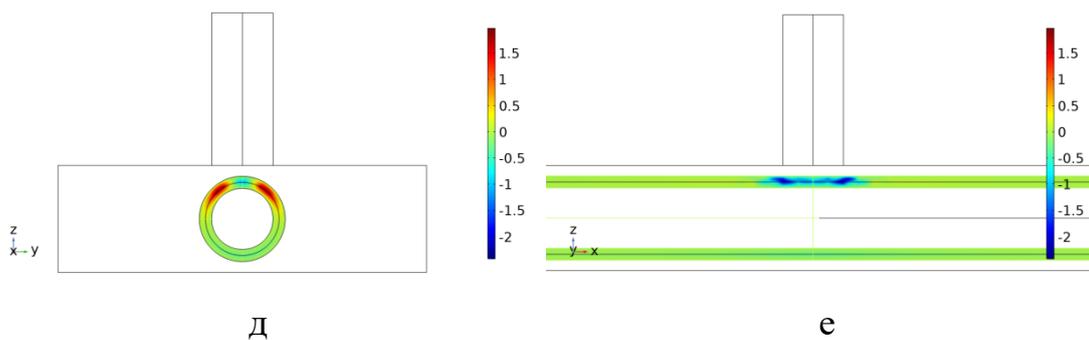


Рис. 4. Поля электрического потенциала  $\phi, В$  в поперечном и продольном сечениях пьезоэлектрического и электролюминесцентного слоев датчика при действии на ворсинку изгибающей поперечной силы  $F_x$  (а, б),  $F_y$  (в, г), крутящего момента  $M_z$  (д, е)

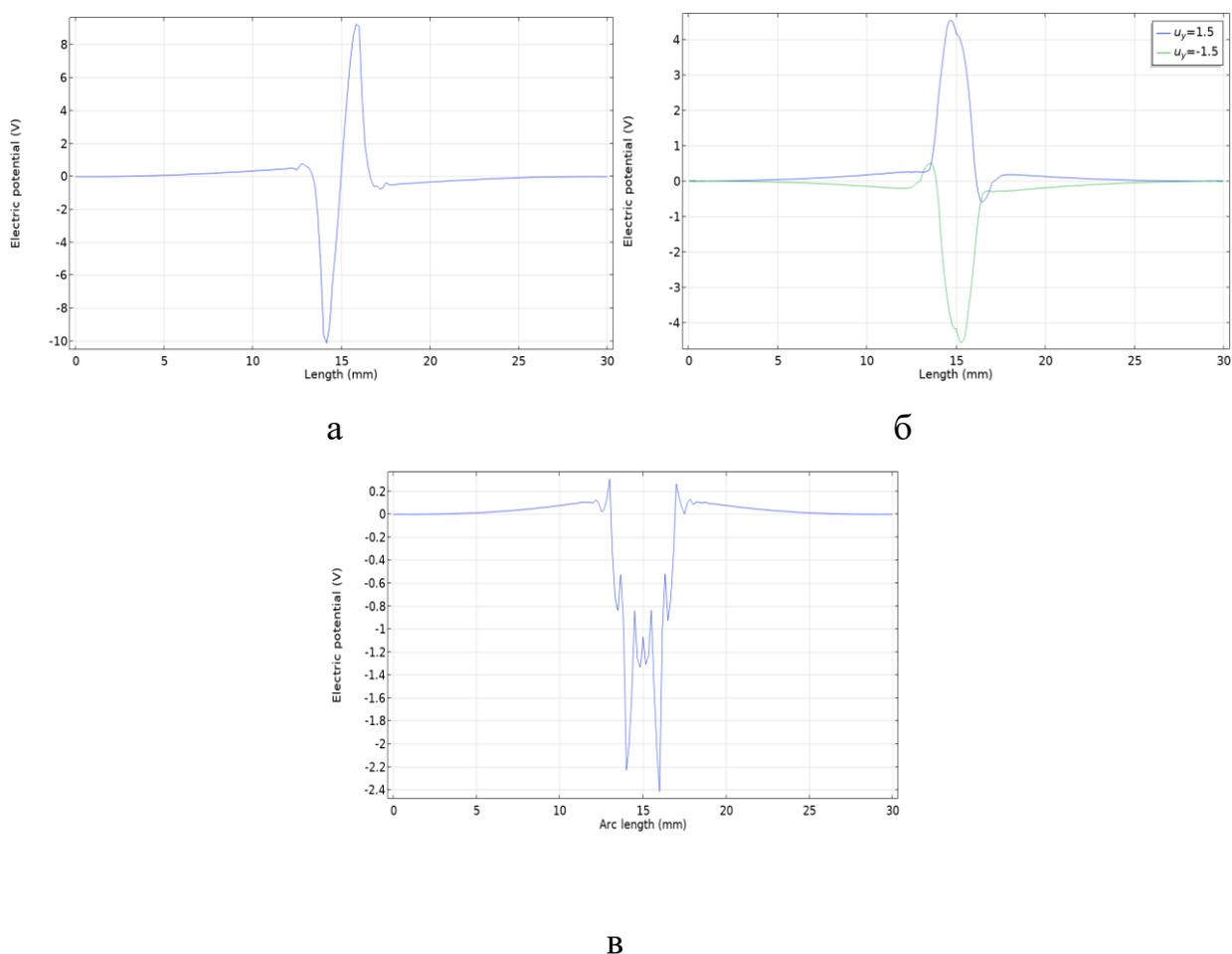


Рис.5. Распределения электрического напряжения  $U_{\text{люм}}, В$  по длине электролюминесцентного слоя датчика при действии на ворсинку изгибающей поперечной силы  $F_x$  (а),  $\pm F_y$  (б), крутящего момента  $M_z$  (в)

силой  $\pm F_y$ , обуславливает смену знака для распределения электрического напряжения  $U_{\text{люм}}$  по длине электролюминесцентного слоя и соответствующим образом изменяет форму информативного светового сигнала на выходе из оптоволоконна датчика.

## Заключение

Разработана электро-механическая модель (рис. 1) тактильного полимерного покрытия [29, 30] со встроенным оптоволоконным пьезоэлектролюминесцентным датчиком [25] при контактном взаимодействии ворсинок покрытия с поверхностью анализируемого объекта. Исследования деформационных и электрических полей, возникающих в элементах тактильного покрытия, в частности, ворсинке, корпусе и встроенном в него датчике, (рис. 3, рис. 4) проведены на основе численного решения в пакете ANSYS пространственной связанной краевой задачи электроупругости для сложно-структурированного объема элементарной ячейки тактильного покрытия с одиночной ворсинкой для различных случаев ее контактного изгибно-крутильного нагружений (рис. 2). Анализ, возникающих при нагружении ворсинки, зон возмущений для исследуемых полей в корпусе и датчике покрытия выявил локальный характер этих зон с их расположением в относительно малой окрестности места консольного закрепления ворсинки. При этом размеры зон возмущений увеличиваются при увеличении жесткости ворсинок и/или уменьшении жесткости материала корпуса покрытия. Анализ формы контактирующего с покрытием объекта осуществляется в результате цифровой обработки информативной интенсивности  $I$  интегрального светового потока на выходе из оптоволоконна датчика. Световой поток формируется информативными световыми импульсами, возникающими на локальных участках электролюминесцентного слоя датчика в зонах возмущений ворсинок. Форма каждого светового импульса определяется распределением значений электрического напряжения  $U_{\text{люм}}$  вдоль участка возмущения электролюминесцентного слоя датчика с учетом суперпозиции электрических

полей (рис. 5) для реализующегося случая сложного контактного нагружения соответствующей ворсинки.

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

### 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.
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.
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.
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.
5. Kappassov Z., Corrales J.-A., Perdereau V. Tactile sensing in dexterous robot hands – Review. *Robotics and Autonomous Systems*. 2015. V.74. P.195-220.
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.
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.
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.
  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.
  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.
  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.
  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.
  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.
  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.

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.
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.
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.
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.
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.
22. Patent US №6399939. Sundaresan M.J., Ghoshal A., Schulz M.J. Sensor array system. Application Date: 13.06.2000. Publication Date: 04.06.2002.
23. Gauthier D., Mueller A., White R.D., et al. Micromachined lateral force sensors for characterization of microscale surface forces during chemical mechanical polishing / MRS Online Proceedings Library. 2008. V.1085: Symposium T – Nanoscale Tribology-Impact for Materials and Devices. P.1085-T05-11.
24. Jia Y., Tian X., Wu Z., et al. Novel mechano-luminescent sensors based on piezoelectric/electroluminescent composites. *Sensors*. 2011. V.11. №4. P.1-9.
25. Патент РФ №2630537. Паньков А.А. Волоконно-оптический датчик давления. Дата заявки: 06.09.2016. Дата публикации: 11.09.2017.
26. Патент РФ №2643692. Паньков А.А. Волоконно-оптический датчик объемного напряженного состояния. Дата заявки: 04.04.2017. Дата публикации: 05.02.2018.
27. Патент РФ №2733093. Паньков А.А. Способ измерения распределенных параметров физико-механических величин. Дата заявки: 14.01.2020. Дата публикации: 29.09.2020.

28. Pan'kov A.A. Piezoelectroluminescent fiber-optic sensors for temperature and deformation fields. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. V.288. P.171-176.
29. Патент РФ №2698958. Паньков А.А. *Сенсорная система*. Дата заявки: 21.12.2018. Дата публикации: 02.09.2019.
30. 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. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012057>
31. Паньков А.А. Электро-механическая модель индикаторного полимерного оптоволоконного PЕL-покрытия механических воздействий. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.1>
32. Krauya U.E., YAnsons Y.L. *Mechanoluminescence of composite materials: Methods, equipment and results of researches*. Riga, Zinatne. 1990. 152 p.
33. Паньков А.А. *Статистическая механика пьезокомполитов*. Пермь, Изд-во Перм. гос. техн. ун-та. 2009. 480 с.

**Для цитирования:**

Паньков А.А., Писарев П.В., Баяндин С.Р. Электро-механическая модель тактильного полимерного оптоволоконного пьезоэлектролюминесцентного покрытия. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.8.3>