

Исследование технических характеристик пьезоэлемента с помощью программы Matlab

Ф.М. Аль-Руфай

Васитский университет, Васит, Ирак

Аннотация: Пьезоэлектрический элемент является одним из наиболее популярных в использовании электронных компонентов, которые применяются в составе многих электронных устройств. Эти устройства весьма эффективно используются в медицине, образовании, строительстве, нефтегазовой отрасли, военной технике, метрологии и многих других. Они входят в состав приборов, обеспечивающих диагностику различных органов человека, замер расхода перекачиваемых жидкостей и газов, утилизирующих механическую энергию человека и транспортных средств с целью последующего ее преобразования в электрическую энергию. С целью получения пьезоэлектрического эффекта необходимо оказать на кристалл определенные воздействия. К таким воздействиям относятся: приложение избыточного давления; сжатие; растяжение; кручение. Ниже рассмотрены критерии, которые влияют на эффективность многослойных пьезопреобразователей.

Ключевые слова: пьезоэлектрический эффект, пьезоэлементы, matlab, технические характеристики, эксплуатационные свойства.

Введение

Пьезоэлектрический эффект был открыт еще в XIX веке. Эффект состоит в том, что во время сжатия или растяжения кристалла на его гранях появляются электрические заряды с разной полярностью. Если к этим граням присоединить электроды, то при сжатии или при растяжении в цепи этих электродов возникнет электрический импульс [1,2].

С целью получения пьезоэлектрического эффекта необходимо оказать на кристалл определенные воздействия. К таким воздействиям относятся: приложение избыточного давления; сжатие; растяжение; кручение [3-5].

В настоящее время известно большое количество кристаллов, воздействие на которых приводит к появлению электрического тока. Среди них следует отметить как природные кристаллы (турмалин, топаз, кварц),

так и кристаллы искусственного происхождения (ортофосфат галлия, лангасит, лангатат) [6].

Использование пьезоэлектрического эффекта началось еще с начала XX века, когда стали появляться микрофоны, локаторы субмарин, сенсоры, генераторы, использующие этот эффект. Широкое распространение пьезоэлектрический эффект нашел в медицине, нефтегазовой отрасли (в контрольно-измерительных приборах), а также в строительстве, и электронной промышленности [7,8].

Основными преимуществами устройств, работа которых основана на действии этого эффекта, являются [9,10]:

- значительный срок службы;
- малые габариты устройств;
- высокая мобильность устройств;
- безотходный процесс генерации энергии;
- отсутствует зависимость от условий окружающей среды;
- возможность применения в различных устройствах, которые имеют разнообразные форму, габариты, назначение;
- могут иметь разные формы и размеры;
- могут быть встроены в различные устройства;
- низкая цена устройств;
- простота обработки пьезоэлектрических материалов;
- высокая стабильность электрических и механических параметров во времени;
- высокая прочность генерирующих устройств.

Следует отметить и некоторые существенные недостатки:

- невысокие значения тока;
 - электрический заряд вырабатывается только во время механического воздействия;
-

- не используются для питания мощных устройств;
- могут использоваться только определенные материалы и кристаллы;
- низкие значения выходного сигнала;
- высокое входное сопротивление измерительной цепи;
- не могут быть использованы для замера статических величин.

Методы и материалы

Несмотря на то, что для каждой серийно выпускаемой модели пьезоэлемента предусматривается комплекс общедоступных технических характеристик, важной задачей является исследование пьезоэлемента в условиях, близких к реальным условиям его эксплуатации.

Таким образом, получаем два основных массива свойств:

- 1) массив A – эксплуатационные свойства;
- 2) массив B – технические характеристики.

Эти условия можно записать следующим образом:

$$\{a_1; a_2; \dots a_n\} \in A$$

$$\{b_1; b_2; \dots b_n\} \in B$$

Массив B представляет собой технические характеристики, предоставляемые вместе с элементом, которые указываются в каталогах на соответствующие пьезоэлементы.

Массив A необходимо выделить по результатам моделирования пьезоэлемента в условиях, близких к реальным условиям эксплуатации. Эксплуатационные свойства показывают эффективность пьезоэлемента.

Выделение этих свойств в дальнейшем позволит смоделировать их в соответствующем ПО.

Для выделения данных свойств рассмотрим приведенные ниже исследования. Различные пьезопреобразователи могут характеризоваться

различными критериями, характеризующими их эффективность. Ниже рассмотрены критерии, которые влияют на эффективность многослойных пьезопреобразователей.

Широкое применение имеют в автомобильной технике, медицине, устройствах замера количества продукции пьезоэлектрические актюаторы.

Эти устройства отличает большое количество слоев, количество может достигать 50...1000 шт. Они выполняются на базе многослойных керамических блоков. Кроме того, в их состав входят до 4...10 пассивных слоев, а также внутренние электроды. В таблице 1 приведены толщины и количество соответствующих слоев многослойных актюаторов.

Таблица № 1

Характеристики слоев многослойных пьезопреобразователей

Наименование слоя	Количество слоев, шт	Толщина слоя, мкм
Керамика (активный слой)	50...1000	50
Пассивный слой	4	100
Внутренний электрод	4...10	6...12

Многослойный пьезоактюатор представляет собой соединенные друг с другом несколько слоев различных материалов. Помимо указанной выше керамики, в состав пьезоактюаторов могут входить сталь, оргстекло, резина [11,12]. То есть многослойный элемент может быть представлен несколькими различными материалами, каждый из которых имеет свои определенные свойства, влияющие на его эффективность и режим работы.

Рассмотрим, как влияют внешние условия и воздействия на эффективность многослойного пьезоактюатора.

На рис. 1 приведена модель двухслойного пьезоактюатора (далее элемента), изготовленного из материалов с различными пьезоэлектрическими свойствами. Элемент имеет консольное закрепление

с одного конца. Второй конец может свободно перемещаться под воздействием прикладываемого к элементу внешнего напряжения.

К условиям эксплуатации в данной модели относятся:

- 1) размеры элемента (определяются в зависимости от устройства, в котором он размещается);
- 2) диапазон приложенного напряжения.

В соответствии с условиями эксплуатации, к нему прикладывают различные значения напряжения, которые вызывают отклонение его незакрепленного конца.

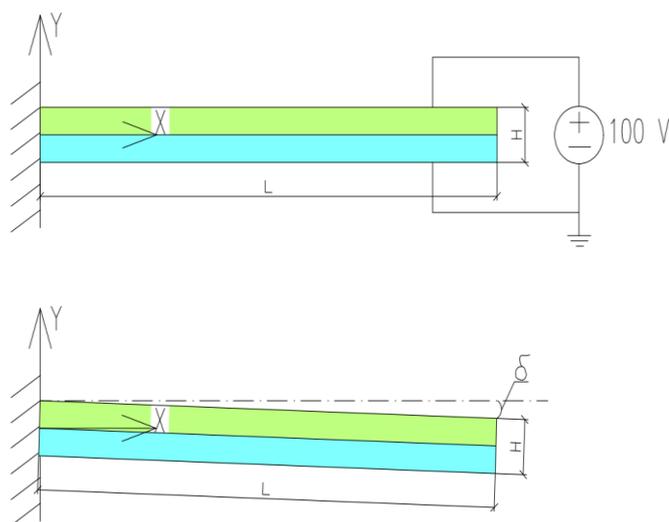


Рисунок 1 Схема биморфного пьезоэлемента

Моделирование пьезоэлемента в программе Matlab

На основании математических выражений, описывающих работу пьезоэлемента консольного типа, конец которого подвержен перемещениям за счет приложенного к нему напряжения, составлена программа в ПО Matlab, которая позволяет отследить перемещения и распределения потенциала в материале двухслойного пьезоэлемента.

В таблице 1 приведены параметры, при которых производилось моделирование пьезоэлемента.

Данные параметры являются эксплуатационными, так как зависят от внешних условий, действующих на пьезоэлемент. Так, например, рабочее напряжение, действующее на него, зависит от цепи, в которую элемент включается.

При проведении исследований, в программе Matlab сформированы варианты условий эксплуатации пьезоэлемента, в которых предусмотрено их варьирование в допустимых пределах.

Установленные пределы отражены в приведенной ниже таблице 2.

Таблица № 2

Исходные данные для моделирования в Matlab

Наименование параметра	Номер варианта расчета	Значение
Приложенное напряжение U (длина 0,1 м, толщина 0,001 м)	1.1	24 В
	1.2	100 В
	1.3	380 В

В таблице 3 приведены технические свойства (характеристики) пьезоэлемента, которые остаются неизменными, независимо от внешних условий и выбираются до начала моделирования.

Таблица № 3

Технические характеристики пьезоэлемента

Наименование параметра	Значение
Модуль упругости материала, Н/м ²	$2,0 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона	0,29
Модуль сдвига	$0,775 \cdot 10^9$
d_{31}	$2,2 \cdot 10^{11}$
d_{33}	$-3,0 \cdot 10^{11}$

Результаты и обсуждение

На рисунках 2-4 приведены графики прогиба пьезоэлемента по каждой из осей и распределение в нем потенциала (электрического поля) от действующего на пьезоэлемент подведенного напряжения.

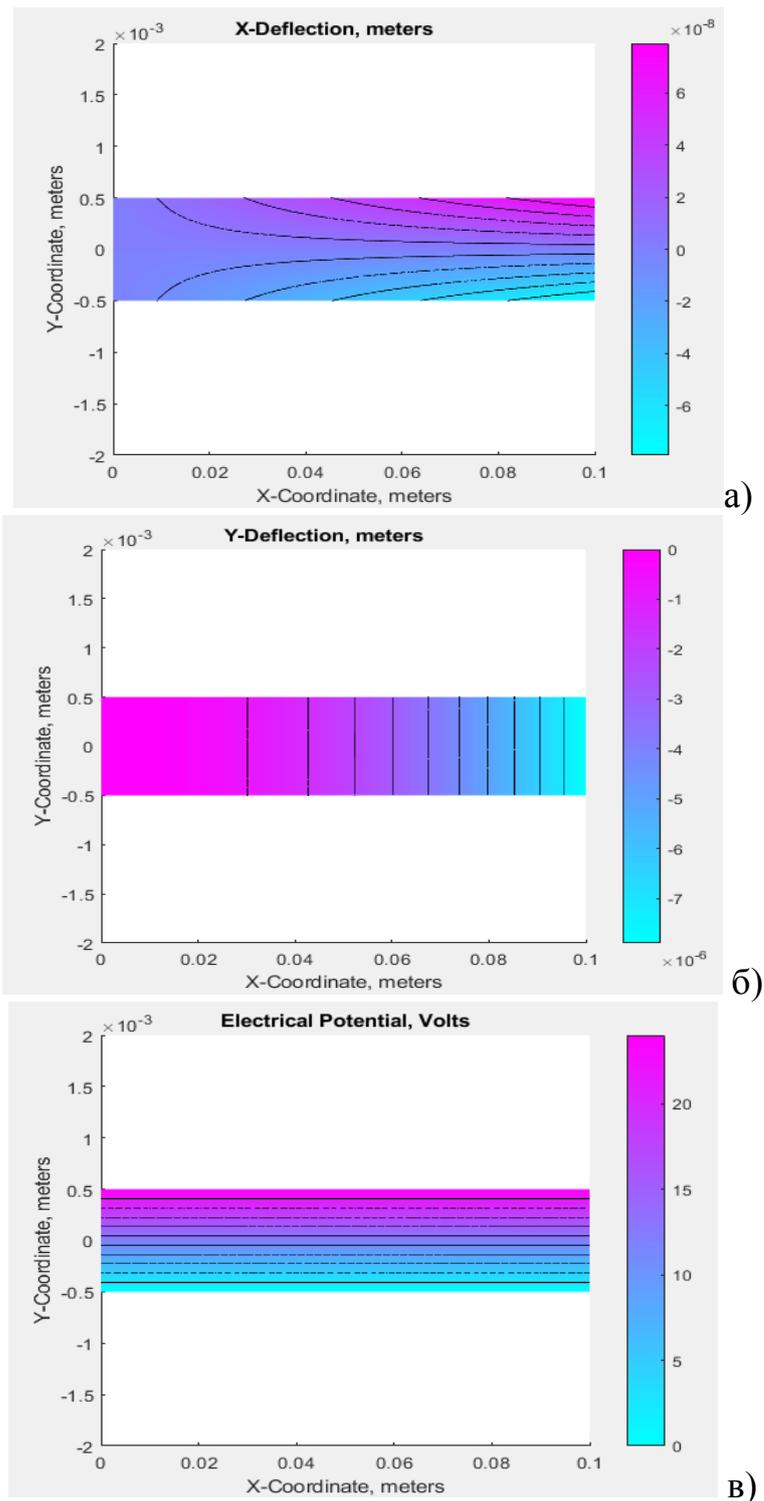


Рис.2. – Распределение перемещений по осям элемента (а, б),
распределение электрических потенциалов (в). Вариант №1.1 (напряжение
24 В)

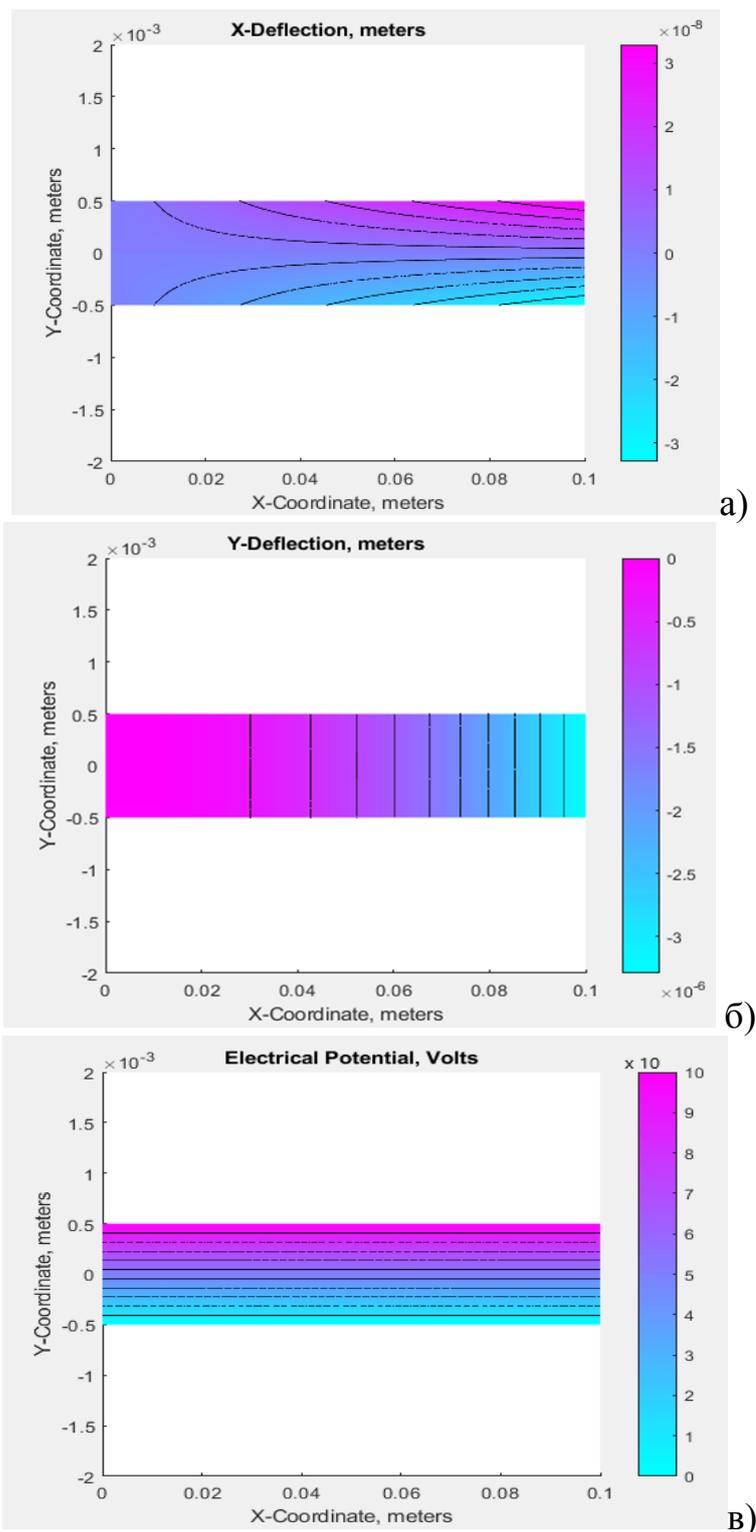


Рис.3. – Распределение перемещений по осям элемента (а, б),
распределение электрических потенциалов (в). Вариант №1.2 (напряжение
100 В)

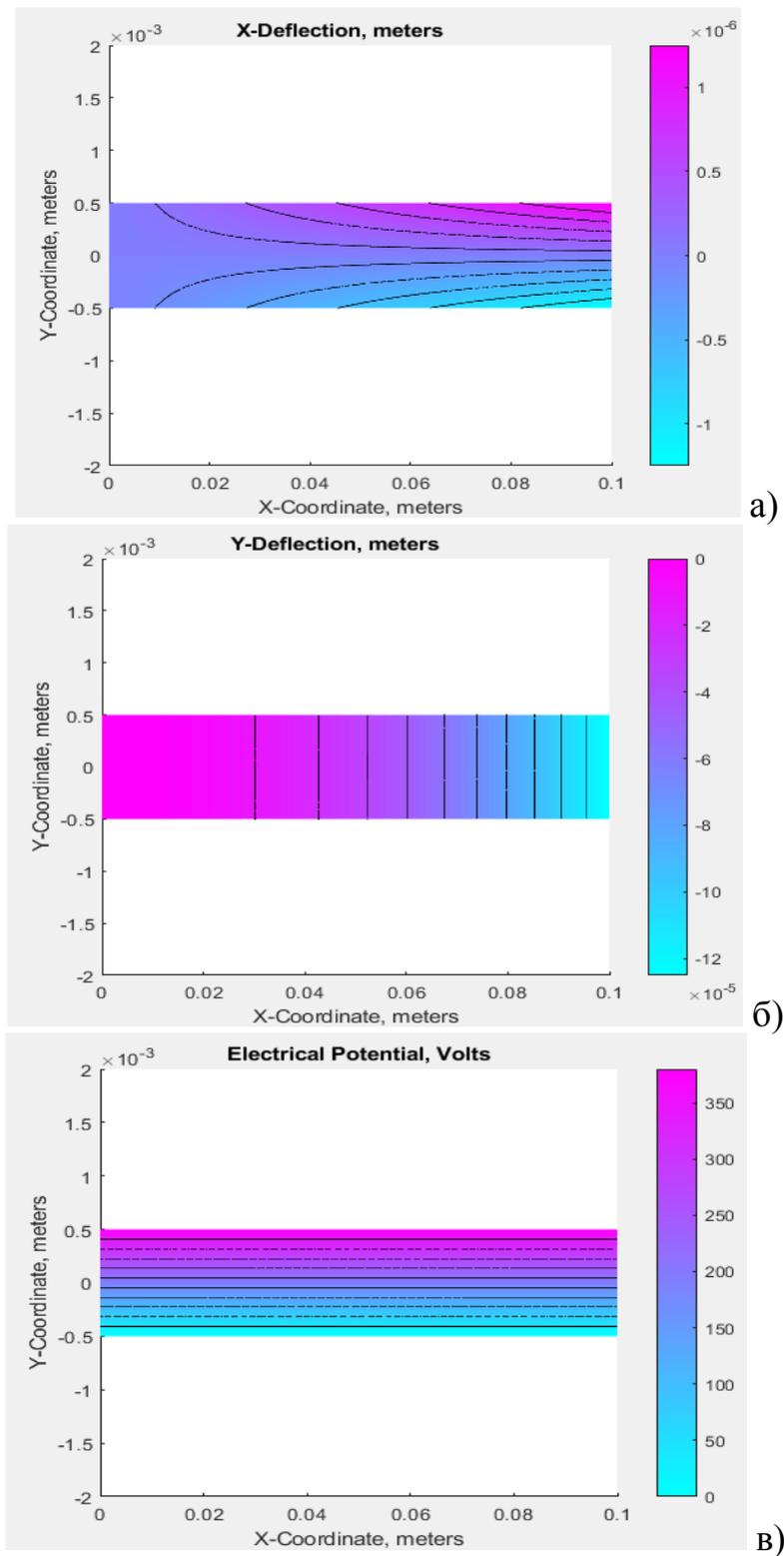


Рис. 4. – Распределение перемещений по осям элемента (а, б),
распределение электрических потенциалов (в). Вариант №1.3 (напряжение
380 В)

В таблице 4 приведены результаты расчетов отклонения незакрепленного конца пьезоэлемента от горизонтального положения по каждому из вариантов.

Таблица № 4

Результаты расчетов отклонения конца пьезоэлемента от горизонтального положения

Номер варианта	Отклонение конца пьезоэлемента, м
1.1	$-7.89 \cdot 10^{-6}$
1.2	$-3,29 \cdot 10^{-5}$
1.3	$-1,25 \cdot 10^{-4}$

На рисунке 5 приведены графики зависимости отклонения конца пьезоэлемента в зависимости от условий эксплуатации.

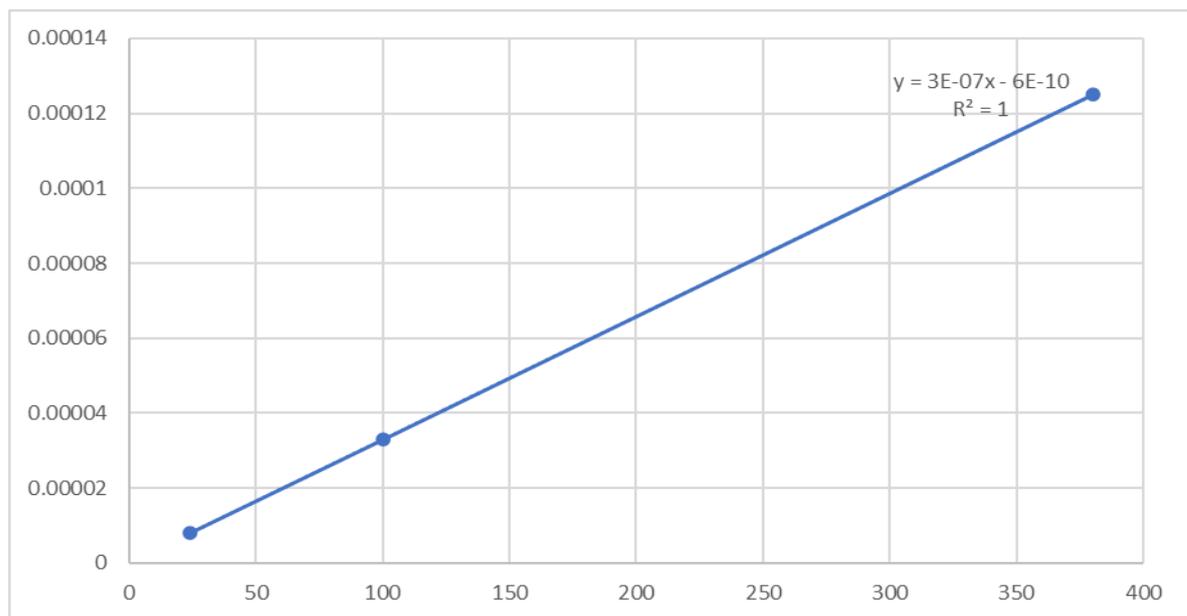


Рис. 5. – График зависимости перемещения конца пьезоэлемента от величины рабочего напряжения

Из этих рисунков видно, при каких условиях возможно получение максимально возможных значений перемещения, если таковые требуются, в соответствии с исходными данными.

Заключение

По результатам проведенного моделирования пьезоэлемента в реальных условиях эксплуатации, можно заключить следующее. С ростом напряжения, приложенного к пьезоэлементу, происходит линейный рост величины перемещений конца пьезоэлемента. Однако, значение напряжения может быть увеличено до определенных пределов, так как зависит от рабочего напряжения выбранной сети, в которой работает устройство с пьезоэлементом. Таким образом, изменяя входные параметры (геометрию пьезоэлемента, приложенное внешнее напряжение), можно получить на выходе нужные параметры перемещений, которые требуются в результате использования пьезоэлемента для заданного электронного устройства.

Литература

1. Чебаненко В.А. Исследование колебаний пьезоэлектрических структур в составе устройств накопления энергии// Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ростов-на-Дону, 2018.–137 с.
2. Аль-Руфай Ф. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В., Аль-Саиди А. А., Бордан Д. Ф. Моделирование и анализ работы системы накопления пьезоэлектрической энергии при помощи программной среды Matlab/Simulink // Интеллектуальные системы в производстве, Том 20, № 3, 2022. с. 24-33. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-3-24-33
3. Зацерклянный О.В., Панич А.Е. Пьезоэлектрические материалы для датчиков вибрации и актюаторов в устройствах измерения плотности жидкостей и газов// Датчики и системы. 2020, №4. С. 48–54.
4. Мараховский М.А., Мараховский В.А., Мирющенко Э.А., Панич Е.А. Исследование возможности создания новых полифазных пьезоматериалов

для гидроакустических преобразователей // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. 2018. С. 616-619.

5. Raspopov, V.Ya., Alaluev, R.V., Ladonkin, A.V., Likhosherst, V.V., Shepilov, S.I. Tuning and Calibration of a Hemispherical Resonator Gyroscope with a Metal Resonator to Operate in Angular Rate Sensor Mode// *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 31–41.

6. de Almeida B. V., Pavanello R. Topology Optimization of the Thickness Profile of Bimorph Piezoelectric Energy Harvesting Devices. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2019, vol. 5, pp. 113–127.

7. Базалевская С.С. Влияние термомеханических воздействия на структуру и фазовый состав пьезоэлектрических кристаллов семейства лангсита // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2020. – 169 с.

8. Crance, J.L., Berchok, C.L., and Keating, J.L. Gunshot call production by the North Pacific right whale *Eubalaena japonica* in the south-eastern Bering Sea// *Endangered Species Research*, 2017, 34, pp. 251-267.

9. Сабиров Ф.С. Датчики пространственных вибраций и диагностика процесса обработки на станках // *Датчики и системы*, №3, 2017. С. 55 – 61.

10. Малыхин А.Ю., Нестеров А.А., Панич А.Е. Особенности механических характеристик сегнетожесткого материала ПКП-35 при использовании в условиях силового ультразвука // *Материалы XIV всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий»*. Москва, 2019.

11. Панич А.Е., Панич А.А., Свирская С.Н., Малыхин А.Ю., Скрылёв А.В., Алексюнин Е.С., Панич Е.А. Инновационные технологии для биомедицинского применения // *Материалы VIII научно-практической конференции с международным участием «Генетика - фундаментальная*

основа инноваций в медицине и селекции.», Ростов-на-Дону - Таганрог, 2019. С. 175-179.

12. Змитриченко Ю.Г., Точильников Г.В., Беспалов В.Г., Бусько Е.А., Козубова К.В., Сенчик К.Ю., Ермакова Е.Д., Жилинская Н.Т., Беркович А.Е. Оценка эффективности термической абляции высокоинтенсивным сфокусированным ультразвуком на модели мышечной ткани крысы// Сборник тезисов VI Петербургского международного онкологического форума «Белые ночи 2020», 2020. С. 282.

References

1. Chebanenko V.A. Issledovanie kolebanij p'ezoelektricheskikh struktur v sostave ustrojstv nakopleniya energii [Study of vibrations of piezoelectric structures in energy storage devices]. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk. Rostov-na-Donu, 2018. 137 p.

2. Al-Rufai F. M., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Al-Saidi A. A., Bordan D. F., Intellektual'nyye sistemy v proizvodstve, Tom 20, № 3, 2022. pp. 24-33. DOI:10.22213/2410-9304-2022-3-24-33

3. Zatserklyannyj, O.V. Panich A.Ye., Datchiki i sistemy. 2020, №4. pp. 48–54.

4. Marakhovskiy M.A., Marakhovskiy V.A., Miryushchenko E.A., Panich Ye.A., Prikladnyye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki. 2018. pp. 616-619.

5. Raspopov, V.Ya, Alaluev, R.V., Ladonkin, A.V., Likhosherst, V.V., Shepilov, S.I., Giroskopiya i Navigatsiya, 2020, vol. 28, no. 1 (108), pp. 31–41.

6. de Almeida B. V., Pavanello R., Journal of Applied and Computational Mechanics, 2019, vol. 5, pp. 113–127.

7. Bazalevskaya S.S., Vliyanie termomekhanicheskikh vozdeystviya na strukturu i fazovyj sostav p'ezoelektricheskikh kristallov semejstva langasita [Influence of thermomechanical effects on the structure and phase composition of piezoelectric



crystals of the Langasite family]. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk. M., 2020. 169 p.

8. Crance, J.L., Berchok, C.L., and Keating, J.L., *Endangered Species Research*, 2017, 34, pp. 251-267.

9. Sabirov F.S., *Datchiki i sistemy*, №3, 2017. pp. 55 – 61.

10. Malykhin A.YU., Nesterov A.A., Panich A.Ye., *Materialy XIV vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Tekhnologii i materialy dlya ekstremal'nykh usloviy»*. Moskva, 2019.

11. Panich A.Ye., Panich A.A., Svirskaya S.N., Malykhin A.YU., Skrylov A.V., Alekseyunin Ye.S., Panich Ye.A., *Materialy VIII nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Genetika - fundamental'naya osnova innovatsiy v meditsine i selektsii.»*, Rostov-na-Donu - Taganrog, 2019. pp. 175-179.

12. Zmitrichenko YU.G., Tochil'nikov G.V., Bepalov V.G., Bus'ko Ye. A., Kozubova K.V., Senchik K.YU., Yermakova Ye.D., Zhilinskaya N.T., Berkovich A.Ye., *Sbornik tezisov VI Peterburgskogo mezhdunarodnogo onkologicheskogo foruma «Belye nochi 2020»*, 2020. p. 282.