

Раздел 2 МОДЕЛИ, СИСТЕМЫ, СЕТИ В ТЕХНИКЕ

Section 2 MODELS, SYSTEMS, NETWORKS IN THE TECHNIQUE

УДК 681.2.087
doi:10.21685/2227-8486-2021-3-7

ВЗАИМОСВЯЗИ СВОЙСТВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ: МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Е. А. Печерская¹, А. В. Фимин²

^{1, 2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹pea1@list.ru, ²mr.lotus@mail.ru,

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается представленная аналитическая модель, в которую сведены параметры пьезоэлектрических материалов, обусловленные воздействием различного рода физических величин (электрических, механических, тепловых, радиационных и химических). *Материалы и методы.* Для получения систематизированной модели применена графовая модель, демонстрирующая механизмы ответных реакций материала на внешнее воздействие. *Результаты.* Исходя из полученной модели представлена группа уравнений, позволяющая ввести дополнительные погрешности при исследованиях, связанных с пьезоэлектрическими материалами. *Выводы.* Предлагаемая методика рассмотрения измерений с применением пьезоэлектрических материалов позволяет сформировать общие представления о подобных экспериментах, а также значительно повысить точность вычислений и технических характеристик датчиковой аппаратуры в целом.

Ключевые слова: пьезоэлектрические материалы, параметры пьезоэлектрика, свойства пьезокерамики, аналитическая модель, метрологический анализ, дополнительные погрешности

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90151.

Для цитирования: Печерская Е. А., Фимин А. В. Взаимосвязи свойств пьезоэлектрических материалов: метрологические аспекты // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2021. № 3. С. 71–79. doi:10.21685/2227-8486-2021-3-7

INTERRELATIONS OF PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC MATERIALS: METROLOGICAL ASPECTS

E.A. Pecherskaya¹, A.V. Fimin²

^{1, 2} Penza State University, Penza, Russia

¹pea1@list.ru, ²mr.lotus@mail.ru

Abstract. *Background.* The paper considers the presented analytical model, which summarizes the parameters of piezoelectric materials due to the influence of various physical quantities (electrical, mechanical, thermal, radiation and chemical). *Materials and methods.* To obtain a systematized model, a graph model is used that clearly demonstrates the mechanisms of the material's responses to external influences. *Results.* Based on the obtained model, a group of equations is presented that allows introducing additional errors in studies related to piezoelectric materials. *Conclusions.* The proposed method of consideration of measurements using piezoelectric materials allows us to form general ideas about such experiments, as well as significantly improve the accuracy of calculations and technical characteristics of sensor equipment as a whole.

Keywords: piezoelectric materials, piezoelectric parameters, properties of piezoceramics, analytical model, metrological analysis, additional errors

Acknowledgement. The research was financed by the RFBR within the research project № 20-38-90151.

For citation: Pecherskaya E.A., Fimin A.V. Interrelations of properties of piezoelectric materials: metrological aspects. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve* = *Models, systems, networks in economics, technology, nature and society*. 2021;(3):71–79. (In Russ.). doi:10.21685/2227-8486-2021-3-7

Введение

В настоящее время пьезоэлектрические материалы широко используются в качестве составных частей технических устройств в виде сенсоров чувствительных элементов [1–3]. При этом ужесточающиеся требования, предъявляемые к оконечным техническим средствам, побуждают разработчиков к проведению полноценного анализа представляемых проектов.

Как отечественными, так и зарубежными учеными ведутся работы по созданию новых пьезоэлектрических материалов с перспективными свойствами, находящими применение в датчиковой аппаратуре, в электромеханических устройствах. Так, исследования [4–6] посвящены проектированию пьезоэлектрического гироскопа, включают анализ частотных режимов его работы, а также определение влияющих погрешностей на систему. В работе [7] представлены результаты разработки полимерсодержащих пьезоэлектриков, которым присущи улучшенные пьезоэлектрические свойства, позволяющие разрабатывать на их основе электромеханические преобразователи, работающие как «на прием», так и на «развитие деформаций».

Таким образом, основным направлением деятельности разработчиков на данный момент является не только создание новых устройств, отвечающих всем современным требованиям, но и полноценный анализ таких приборов с целью улучшения точности и качества измерительных систем в целом [8, 9].

Авторами предложена модель взаимосвязи факторов – воздействий на исследуемый пьезоэлектрический образец и его ответных реакций. На основании модели представлен метрологический анализ, учитывающий влияние разнородных факторов на исследуемую структуру. Важно отметить, что разработанная модель является универсальной для большинства задач и в конкретных ситуациях может быть упрощена (например, при фиксации некоторых влияющих параметров – воздействий).

Разработка аналитической модели пьезоэлектрического материала

Аналитическая модель воздействующих факторов основывается на различных группах физических величин в зависимости от рода их происхождения:

1. Электрические – напряженность электрического поля (E), спонтанная поляризованность (P), частота (f).
2. Механические – механическое напряжение (X), деформация (x).
3. Тепловые – температура (T), температура фазового перехода (T_C).
4. Радиационные – доза рентгеновского облучения (R).
5. Химические – степень дефектности материала (z), процентное содержание компонента, влияющего на пьезоэлектрические свойства (y).

Наиболее информативно взаимосвязи между свойствами пьезоэлектрического материала при внешних воздействиях и его ответными реакциями отображает графовая модель, представленная на рис. 1. Вершины графа показывают параметры, причем стрелка направлена от воздействующего параметра на пьезоэлектрический материал к параметру-реакции. Соответствующие линии, соединяющие вершины, представляют собой свойства материала, которые характеризуют наличие функциональной зависимости между параметрами-воздействиями и ответными реакциями.

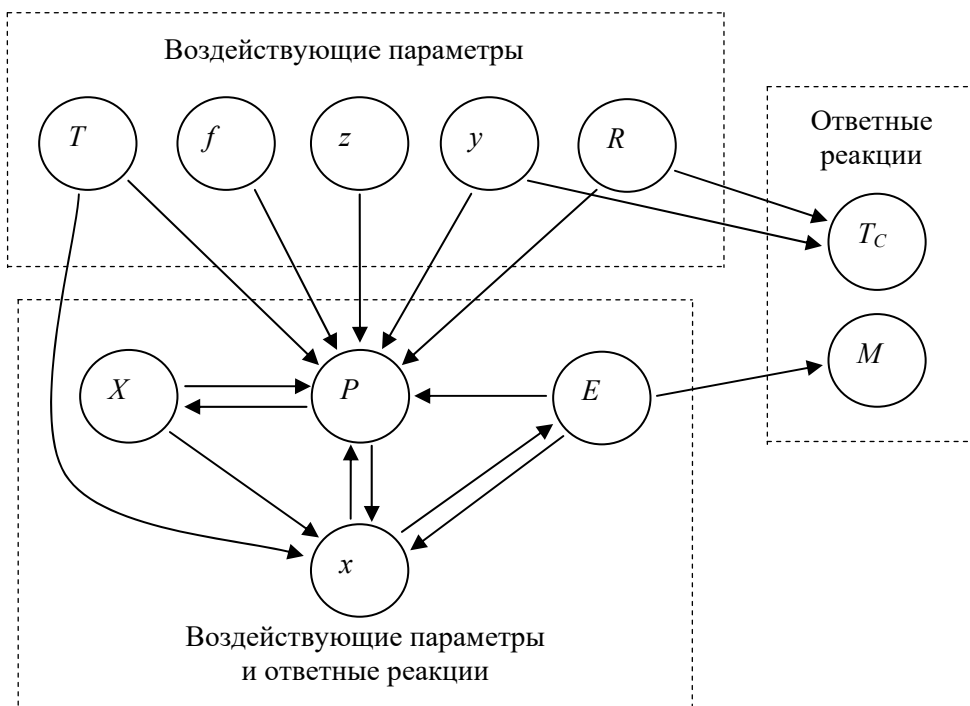


Рис. 1. Модель, показывающая взаимосвязь воздействий на исследуемый пьезоэлектрический образец и его ответных реакций

Например, зависимость температуры фазового перехода и намагниченности от различных физических величин крайне важна при разработке датчиковой аппаратуры, у которой чувствительный элемент выполнен из пьезоэлектрического материала.

Применение предложенной модели позволяет выявить наличие дополнительных погрешностей измерения электрофизических параметров пьезоэлектриков, обусловленных изменением внешних факторов.

Метрологический анализ аналитической модели пьезоэлектрического материала

Обобщенную систему математических уравнений (при использовании соотношений Максвелла для термодинамических функций) целесообразно представить следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial E = a \partial x, \\ \partial x = \alpha \partial T + d' \partial E + k \partial X + b' \partial P, \\ \partial P = \rho \partial T + \eta \partial E + n_{p,z} \partial z + n_{p,y} \partial y + \\ \quad + n_{p,R} \partial R + n_{p,f} \partial f + e \partial x, \\ \partial T_C = n_{T_C,y} \partial y + n_{T_C,R} \partial R, \\ \partial X = d \partial P, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $a = \frac{\partial E}{\partial x}$ – постоянная пьезоэлектрического напряжения; $\alpha = \frac{\partial x}{\partial T}$ – константа теплового расширения; $d' = \frac{\partial x}{\partial E}$ – коэффициент, характеризующий пьезоэффект; $k = \frac{d}{e}$ – коэффициент Гука; $b' = \frac{\partial x}{\partial P}$ – константа, отражающая обратный пьезоэффект; $\rho = \frac{\partial P}{\partial T}$ – коэффициент, характеризующий пирозоэффект; $\eta = \frac{\partial P}{\partial E}$ – постоянная диэлектрической восприимчивости; $n_{p,z} = \frac{\partial P}{\partial z}$, $n_{p,y} = \frac{\partial P}{\partial y}$, $n_{p,R} = \frac{\partial P}{\partial R}$, $n_{p,f} = \frac{\partial P}{\partial f}$ – коэффициенты, описывающие влияние соответствующих параметров (z , y , R , f) на поляризованность; $e = \frac{\partial P}{\partial x}$ – константа пьезоэффекта; $n_{T_C,y} = \frac{\partial T_C}{\partial y}$, $n_{T_C,R} = \frac{\partial T_C}{\partial R}$ – коэффициенты, соответственно описывающие влияние y и R на T_C ; $d = \frac{\partial X}{\partial P}$ – коэффициент обратной пьезоэлектрической деформации.

Представленные уравнения для дополнительных погрешностей, сопровождающих пьезоэлектрический материал, обусловлены влиянием на результаты измерений изменяющихся неинформативных параметров (для конкрет-

ного эксперимента) и внешних факторов. Это приводит к необходимости указания области неопределенности влияющих величин при исследовании однофакторных зависимостей между параметрами пьезоэлектриков. В случае выхода значений влияющих величин за установленные пределы следует учитывать возникающие дополнительные погрешности. Формализация дополнительных погрешностей, имеющих место при измерении конкретных параметров пьезоэлектриков, позволяет установить область неопределенности результатов измерений, что способствует повышению их достоверности.

Однако при выполнении измерений фиксация точных значений параметров практически не реализуема ввиду наличия прямых и обратных физических эффектов [9, 10]. Так, при расчете конкретных значений механических параметров требуется выполнить условие равенства нулю изменения деформации с помощью механического зажатия образца. В этом случае механическое напряжение может быть постоянным или отсутствовать, но проявление у пьезоэлектрика пьезоэлектрических и термодинамических свойств приводит к тому, что механическая деформация изменяется не только под воздействием механического напряжения, но и вследствие изменения значений напряженности электрического поля, спонтанной поляризованности и температуры.

При температуре ниже фазового перехода в сегнетоэлектрической фазе при использовании соотношений Мерца изменение напряженности электрического поля влечет за собой изменение спонтанной поляризации и деформаций, что отражено в формуле

$$\Delta x = (2\rho P_{\text{сп}}) \Delta P + \sigma (\Delta P)^2, \quad (2)$$

где коэффициент σ характеризует электрострикционный эффект.

При введении уравнения для постоянной диэлектрической восприимчивости в виде $\eta = \frac{\Delta P}{\Delta E}$ (при прочих фиксированных параметрах) формулу (2) можно преобразовать в уравнение

$$\Delta x = (2\sigma P) \eta \Delta E + \sigma (\eta \Delta E)^2. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) доказывают невозможность фиксации точных значений механических параметров. Следовательно, целесообразно задание области неопределенности деформации. В свою очередь область неопределенности можно задать либо в виде функциональной зависимости $\Delta l(\Delta E)$, либо в виде предельного значения $\pm \Delta l$.

Аналогичным образом получены выражения для дополнительных погрешностей измерения других параметров пьезоэлектрических материалов, учтенных в аналитической модели (1):

1. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения постоянной пьезоэлектрического эффекта $\delta d'$ рассчитывается по формуле

$$\delta d' = \frac{\Delta d'}{d'} = \frac{\Delta x d'}{\partial x}, \quad (4)$$

где $\Delta x d' = \alpha \partial T + k \partial X + b' \partial P$.

2. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента упругости δk определяется формулой

$$\delta k = \frac{\Delta k}{k} = \frac{\Delta l k}{\partial x}, \quad (5)$$

где $\Delta l k = \alpha \partial T + d' \partial X + b' \partial P$.

3. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента пьезоэлектрического напряжения δa вычисляется по следующей формуле:

$$\delta a = \frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta P a}{\partial x}, \quad (6)$$

где $\Delta P a = \rho \partial T + \eta \partial E + n_{P,x} \partial x + d' \partial X + n_{P,D} \partial D + n_{P,f} \partial f$.

4. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения обратного пьезоэлектрического напряжения $\delta b'$ рассчитывается по формуле

$$\delta b' = \frac{\Delta b'}{b'} = \frac{\Delta x b'}{\partial x}, \quad (7)$$

где $\Delta x b' = \alpha \partial T + d' \partial E + k \partial X$.

5. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента теплового расширения $\delta \alpha$ определяется по формуле

$$\delta \alpha = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\Delta x \alpha}{\partial x}, \quad (8)$$

где $\Delta x \alpha = d' \partial E + k \partial X + b' \partial P$.

6. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения пьезоэлектрического коэффициента $\delta \rho$ вычисляется формулой

$$\delta \rho = \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P \rho}{\partial P}, \quad (9)$$

где $\Delta P \rho = \eta \partial E + n_{P,x} \partial x + d' \partial X + n_{P,R} \partial R + n_{P,f} \partial f + e \partial x$.

7. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента, описывающего влияние давления на температуру Кюри, $\delta n_{T_C,y}$ исчисляется по формуле

$$\delta n_{T_C,y} = \frac{\Delta n_{T_C,y}}{\alpha n_{T_C,y}} = \frac{\Delta T_C n_{T_C,y}}{\partial T_C}, \quad (10)$$

где $\Delta T_C n_{T_C,y} = n_{T_C,x} \partial x + n_{T_C,R} \partial R$.

8. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента, описывающего влияние γ (облучения дозой R) на температуру Кюри, $\delta n_{T_C,R}$ определяется формулой

$$\delta n_{T_C,R} = \frac{\Delta n_{T_C,R}}{n_{T_C,R}} = \frac{\Delta T_C n_{T_C,R}}{\partial T_C}, \quad (11)$$

где $\Delta T_C n_{T_C,R} = n_{T_C,x} \partial x + n_{T_C,y} \partial y$.

9. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента, описывающего влияние γ (облучения дозой R) на спонтанную поляризованность, $\delta n_{P,R}$ вычисляется по формуле

$$\delta n_{P,R} = \frac{\Delta n_{P,R}}{n_{P,R}} = \frac{\Delta P n_{P,R}}{\partial P}, \quad (12)$$

где $\Delta P n_{P,R} = \rho \partial T + \eta \partial E + n_{P,x} \partial x + n_{P,f} \partial f + e \partial x$.

10. Предельная относительная дополнительная погрешность измерения коэффициента, описывающего влияние частоты на спонтанную поляризованность, $\delta n_{P,f}$ рассчитывается по формуле

$$\delta n_{P,f} = \frac{\Delta n_{P,f}}{n_{P,f}} = \frac{\Delta P n_{P,f}}{\partial P}, \quad (13)$$

где $\Delta P n_{P,f} = \rho \partial T + \eta \partial E + n_{P,x} \partial x + n_{P,R} \partial R + e \partial x$.

Таким образом, предложенная графовая модель, ее аналитическая интерпретация в виде системы уравнений (1) позволяют осуществить метрологический анализ и вывести формулы для описания дополнительных погрешностей. В свою очередь выражения для дополнительных погрешностей (4)–(13) демонстрируют влияние различных физических величин, оказывающих воздействие на исследуемый пьезоэлектрический материал, что свидетельствует о необходимости их учета при проведении измерений с целью повышения их достоверности.

Заключение

На основе систематизации разнородных факторов (в том числе электрических, механических, тепловых и др.), оказывающих влияние на свойства пьезоэлектриков, авторами разработаны модель в виде ориентированного графа и ее аналитическая интерпретация в виде системы дифференциальных уравнений. В результате метрологического анализа разработанной аналитической модели взаимосвязи свойств пьезоэлектрических материалов получены формулы для оценивания области неопределенности дополнительных погрешностей. Показано, что дополнительные погрешности обусловлены отклонением влияющих параметров от заданных фиксированных значений. Полученные результаты направлены на повышение достоверности результатов измерений параметров пьезоэлектриков; апробированы при проектировании автоматизированной системы измерений электрофизических параметров пьезоэлектриков.

Список литературы

1. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В. [и др.] Исполнительные устройства и системы для микроперемещений : учеб. пособие. СПб. : Ун-т ИТМО, 2017. 134 с.
2. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики. М. : Техносфера, 2006. 628 с.

3. Матвеев В. В., Распопов В. Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем : учеб. пособие. СПб. : Концерн «ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 278 с.
4. Левицкий А. А., Маринушкин П. С. Исследование погрешностей миниатюрного пьезоэлектрического гироскопа // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 9. С. 34–38.
5. Левицкий А. А., Маринушкин П. С. Исследование режимов работы пьезоэлектрического вибрационного гироскопа осцилляторного типа // Датчики и системы. 2011. № 3. С. 55–59.
6. Левицкий А. А., Маринушкин П. С. Моделирование пьезоэлектрических вибрационных гироскопов // Интеллект и наука : сб. науч. тр. X Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск : ИПК СФУ, 2010. С. 50–51.
7. Лушчейкин Г. А. Новые полимерсодержащие пьезоэлектрические материалы // Физика твердого тела. 2006. № 6. С. 963–964.
8. Печерская Е. А., Метальников А. М., Бобошко А. В. Структура интеллектуальной системы поддержки исследований параметров сегнетоэлектрических материалов // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6 (131). С. 21–24.
9. Печерская Е. А., Соловьев В. А., Метальников А. М. [и др.]. Контроль временной неустойчивости диэлектрических параметров сегнетоэлектриков // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2013. № 2 (100). С. 84–88.
10. Gurin S. A., Pecherskaya E. A., Spitsyna K. Y. [et al.]. Thin piezoelectric films for micromechanical systems // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 : proceedings. Moscow : Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9067450.

References

1. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V. [et al.]. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy: ucheb. posobie = Actuators and systems for micro-displacements : textbook*. Saint Petersburg: Un-t ITMO, 2017:134. (In Russ.)
2. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki = Piezoelectric sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2006:628. (In Russ.)
3. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem: ucheb. posobie = Fundamentals of building free-form inertial navigation systems : textbook*. Saint Petersburg: Kontsern «TsNII "Elektropribor"», 2009: 278. (In Russ.)
4. Levitskiy A.A., Marinushkin P.S. Investigation of errors of a miniature piezoelectric gyroscope. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki = Successes of modern radio electronics*. 2012;(9):34–38. (In Russ.)
5. Levitskiy A.A., Marinushkin P.S. Investigation of operating modes of a piezoelectric vibrating gyroscope of oscillatory type. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2011;(3):55–59. (In Russ.)
6. Levitskiy A.A., Marinushkin P.S. Modeling of piezoelectric vibration gyroscopes. *Intellekt i nauka: sb. nauch. tr. X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Intelligence and Science: a collection of scientific papers X International scientific and practical conference*. Krasnoyarsk: IPK SFU, 2010:50–51. (In Russ.)
7. Lushcheykin G.A. New polymer-containing piezoelectric materials. *Fizika tverdogo tela = Solid state physics*. 2006;(6):963–964. (In Russ.)
8. Pecherskaya E.A., Metal'nikov A.M., Boboshko A.V. The intellectual structure of the support system for the study of parameters of ferroelectric materials. *Nano- i mikro-sistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technologies*. 2011;(6):21–24. (In Russ.)

9. Pecherskaya E.A., Solov'ev V.A., Metal'nikov A.M. [et al.]. Control of time instability of dielectric parameters of ferroelectrics. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektronika* = *News of higher educational institutions. Electronics*. 2013;(2):84–88. (In Russ.)
10. Gurin S.A., Pecherskaya E.A., Spitsyna K.Y. [et al.]. Thin piezoelectric films for micromechanical systems. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020: proceedings*. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020:9067450.

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Анатольевна Печерская
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой
информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya
Doctor of technical sciences,
associate professor,
head of the sub-department
of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Андрей Владимирович Фимин
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mr.l0tus@mail.ru

Andrey V. Fimin
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.07.2021

Поступила после рецензирования/Revised 11.08.2021

Принята к публикации/Accepted 30.08.2021