

Методика определения физико-механических параметров пьезоэлектрической керамики

О.Н. Петрищев¹, К.В. Базило^{2,*}

¹ *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», пр. Победы, 37, 03056 Киев, Украина*

² *Черкасский государственный технологический университет, ул. Шевченко, 460, 18006 Черкассы, Украина*

(Получено 24.02.2017; в отредактированной форме – 12.06.2017; опубликовано online 30.06.2017)

Конечной целью математического моделирования физического состояния колеблющихся пьезокерамических элементов является качественное и количественное описание характеристик и параметров существующих в них электрических и упругих полей. Совершенно ясно, что получение содержательных и достоверных количественных оценок параметров физического состояния пьезоэлектрических (пьезокерамических) элементов не представляется возможным без достоверных данных о величинах физико-механических констант материалов. Предложена методика экспериментального определения материальных констант пьезокерамики, которая позволяет в рамках эксперимента на одном образце определить три (из четырех не равных друг другу) модуля упругости, два (из двух не равных друг другу) пьезомодуля, и одно из двух не равных друг другу значение диэлектрической проницаемости. Впервые в практике измерения материальных констант пьезокерамики был поставлен и разрешен вопрос об определении частотной зависимости уровня потерь энергии в объеме колеблющейся пьезокерамики.

Ключевые слова: Тонкий диск, Пьезокерамика, Электрический импеданс, Физико-механические константы.

DOI: [10.21272/jnep.9\(3\).03022](https://doi.org/10.21272/jnep.9(3).03022)

PACS numbers: 77.65.Bn, 62.20.dq

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность применения различных функциональных элементов пьезоэлектроники в силовых и информационных системах объясняется, прежде всего, их высокой надежностью. Одним из основных элементов таких систем является пьезокерамический трансформатор [1], который является альтернативой электромагнитным трансформаторам в тех сферах их применения, где необходима высокая надежность, стабильность, автономность, максимальная длительность безотказной работы [2]. Объектами, где необходимо применение таких сверхнадежных трансформаторов напряжения являются: автоматические межпланетные станции; автономные глубоководные плавающие объекты; любые другие объекты, доступ к которым сильно затруднен, невозможен или чрезвычайно опасен для человека (ядерные реакторы; химически опасные объекты, станции в Антарктиде и Арктике, подземные объекты, орбитальные спутники и т.д.).

Пьезоэлектрический трансформатор имеет ряд преимуществ по сравнению с электромагнитным, а именно [3, 4]: высокую удельную мощность; отсутствие электромагнитных помех; высокую эффективность; возможность миниатюризации; широкий частотный диапазон; огнестойкость; простая технология изготовления. Чрезвычайно широкие возможности пьезотрансформаторов позволяют использовать их при создании разнообразных аналоговых и дискретных устройств преобразования сигналов.

В настоящее время пьезотрансформаторы находят все большее применение в областях, где требуется получение высоких напряжений. Практика при-

менения пьезотрансформаторов показывает, что они достаточно эффективно работают на первой или на второй моде колебаний в области частот от нескольких десятков до сотен килогерц.

Пьезотрансформаторы находят широкое применение в современной светотехнической аппаратуре и приборах. Они позволяют минимизировать габариты устройств зажигания и питания различного класса газоразрядных ламп, создавать высокоэффективные высокочастотные источники питания с КПД до 95 %, обеспечивающие повышение долговечности ламп в 5-10 раз и светоотдачу более чем в 1,4 раза [5, 6].

Однако использование пьезотрансформаторов сдерживается сложностью адекватного аналитического описания их моделей. Конечной целью математического моделирования физического состояния колеблющихся пьезокерамических элементов является качественное и количественное описание характеристик и параметров существующих в них электрических и упругих полей. Совершенно ясно, что получение содержательных и достоверных количественных оценок параметров физического состояния пьезоэлектрических (пьезокерамических) элементов не представляется возможным без достоверных данных о величинах физико-механических констант материалов.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Интенсивное и широкомасштабное практическое применение синтетических пьезоэлектриков (пьезокерамик) явилось новым импульсом, стимулирующим развитие экспериментальных методов определения физико-механических параметров пьезоак-

* b_constantine@ukr.net

тивных материалов.

При ближайшем рассмотрении многообразие методов измерения материальных констант пьезоэлектрических керамик можно разбить на три группы, а именно:

- метод резонанса-антирезонанса и его модификации;
- метод круговых диаграмм и его модификации;
- ультразвуковые методы.

Ультразвуковые методы в своей теоретической основе опираются на формализм собственных чисел и собственных векторов тензора Кристоффеля и предполагают измерение скоростей распространения плоских волн различной поляризации. Недостатками этого метода экспериментальных исследований являются сложность подготовки образцов и сложность возбуждения плоских волн, которые должны распространяться в строго определенных в пространстве кристаллографических осей направлениях.

Метод круговых диаграмм базируется на математической модели электрического импеданса исследуемого образца. Достоверность результатов, которые получаются с помощью этого метода, определяется степенью адекватности математической модели реальному объекту.

Метод резонанса-антирезонанса, по свидетельству У. Кэди, восходит к работам Уоррена Мэсона и предполагает измерение частот электромеханических резонансов и антирезонансов установившихся колебаний исследуемых образцов. Как и в методе круговых диаграмм, теоретической основой является математическая модель электрического импеданса исследуемого образца. По этой причине все погрешности метода круговых диаграмм присущи и методу резонанса-антирезонанса.

В работе [7] впервые была предпринята попытка разработки методики экспериментального определения физико-механических параметров пьезоэлектрической керамики, которая опиралась на основные представления механики деформируемого твердого тела с усложненными (пьезоэлектрическими) свойствами. Недостатком способа, описанного в работе [7], является склейка двух пьезокерамических дисков. Эта склейка обладает плохо воспроизводимыми (особенно на длительном интервале времени) характеристиками, которые хотя и в незначительной степени, но влияют на результаты экспериментального определения модулей упругости биморфного пьезокерамического элемента. Именно по этой причине представляется необходимым так изменить трехдиапазонный метод резонанса-антирезонанса [7], чтобы исключить из результатов эксперимента трудно прогнозируемое влияние параметров склеивающего слоя.

Известно, что при описании различных форм колебаний одного и того же объекта используются различные наборы материальных констант. Так, при описании толщинных колебаний поляризованной по толщине пьезокерамической пластинки требуется, как минимум, знание модуля упругости c_{33}^E (модуль упругости, измеряемый в режиме постоянства (равенства нулю) напряженности электрического поля), пьезомодуля e_{33} и диэлектрической проницаемости

χ_{33}^E (диэлектрическая проницаемость, измеряемая в режиме постоянства (равенства нулю) деформации или, как иногда говорят, но это правильно лишь наполовину, проницаемость зажатого пьезоэлектрика). При описании радиальных колебаний поляризованного по толщине пьезокерамического диска требуется знание гораздо большего числа материальных констант, а именно $c_{11}^E, c_{12}^E, c_{13}^E, c_{33}^E, e_{31}, e_{33}$ и χ_{33}^E . Сопоставляя между собой результаты измерения модулей упругости c_{12}^E и c_{13}^E , несложно заметить, что они отличаются друг от друга на величину, которая редко превосходит уровень 0,3–0,5 % от номинального значения. В действительности, упругие свойства поляризованной по толщине пьезокерамической пластинки в плоскости, которая перпендикулярна кристаллографической оси Z , являются трансверсально изотропными. Этот факт дает основания для вывода, что оценка числовых значений модулей упругости $c_{\alpha\beta}^E$ может и должна производиться в предположении, что $c_{12}^E = c_{13}^E$. Более того, можно доказать путем формальных рассуждений, что напряженно-деформированное состояние пластинки в режиме толщинных колебаний описывается с помощью модуля упругости c_{33}^E только лишь в том случае, когда выполняется равенство $c_{12}^E = c_{13}^E$.

Таким образом, необходимо построить непротиворечивую методику экспериментального определения материальных констант пьезокерамики, которая доставляет достоверные значения минимум трех модулей упругости, двух элементов матрицы пьезомодулей и одного элемента матрицы диэлектрических проницаемостей, что и является **целью** работы.

3. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [8] рассмотрена методика расчета электрического импеданса пьезокерамического диска в области низких, средних и высоких частот. Схема для проведения экспериментальных исследований приведена на рис. 1.

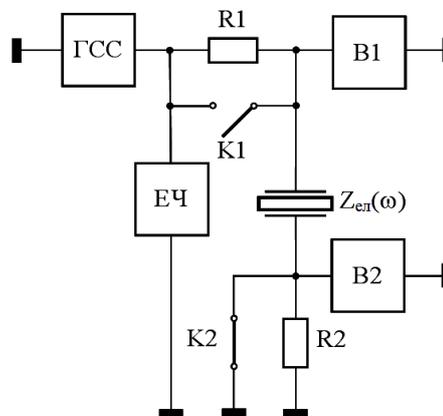


Рис. 1 – Электрическая схема макета для измерения электрического импеданса пьезокерамического диска в широком диапазоне частот

Перед началом измерения электрического импеданса пьезокерамический диск взвешивают и измеряют его толщину a и радиус R . По известной массе m и размерам a и R определяется плотность пьезокерамики $\rho_0 = m/(\pi a R^2)$, кг/м³. Для выполнения экспериментальных исследований рекомендуется использовать массивные диски. При этом минимизируются эффекты, связанные с присоединенной массой, которая возникает в процессе пайки проводников к электродированным поверхностям диска.

При измерении электрического импеданса $Z_{el}(\omega)$ диск рекомендуется подвешивать в воздухе на тонких нитях для того, чтобы избежать механического контакта с другими объектами. В помещении, где выполняются измерения, должен соблюдаться режим тишины.

Измерения электрического импеданса рекомендуется проводить на макете, электрическая схема которого показана на рис. 1. На схеме аббревиатурой ГСС обозначен генератор синусоидальных сигналов, ЭСЧ – электронно-счетный частотомер, В1 и В2 – электронные вольтметры, К1 и К2 – механически замыкаемые и размыкаемые ключи, R1 и R2 – нагрузочные резисторы. Символом $Z_{el}(\omega)$ на рис. 9 обозначен исследуемый образец. Показанное на схеме положение ключей К1 и К2 соответствует режиму измерения электрического импеданса в окрестности частоты электромеханического резонанса. При измерениях в окрестности частот электромеханических антирезонансов ключ К1 должен быть замкнут, а ключ К2 – разомкнут. Нагрузочные резисторы R1 и R2 подбираются таким образом, чтобы вольтметры В1 и В2 работали в диапазоне своей максимальной чувствительности, т. е. на шкалах (1 ÷ 10) мВ. Величины резисторов R1 и R2 должны быть определены с точностью до одного Ома.

Перед началом измерений в широком диапазоне частот на измерительном мосту определяется динамическая электрическая емкость C_d^σ в области низких частот. По значениям этой емкости находится диэлектрическая проницаемость

$$\chi_{33}^\sigma = \alpha C_d^\sigma / (\pi R^2), \text{ Ф/м.}$$

В ходе измерения электрического импеданса $Z_{el}(\omega)$ должно быть сформировано четкое представление о частотно зависимом изменении функции $Z_{el}(\omega)$ и должны быть установлены границы областей средних и высоких частот, а также определены границы переходной области. По выполнении всех измерений образуется следующая база экспериментальных данных:

– область средних частот:

частоты первого и второго электромеханических резонансов (f_{r1} и f_{r2}) и антирезонансов (f_{a1} и f_{a2}), которые определяются с точностью до одного герца;

электрический импеданс на частотах первого и второго электромеханических резонансов, т. е. действительные положительные величины $Z_{el}(f_{r1})$ и $Z_{el}(f_{r2})$, определенные с точностью до десятых долей ома;

значение динамической электрической емкости C_d^ε пьезокерамического диска, которое определяется

через электрический импеданс диска, измеренный на частоте $f^* = (f_r + f_a)/2$, где $f_r = (f_{r1} + f_{r2})/2$ и $f_a = (f_{a1} + f_{a2})/2$;

– область высоких частот:

частоты первого и второго толщинного электромеханического резонанса, т. е. величины F_{r1} и F_{r2} , измеренные с точностью до одного герца, а также измеренная с той же точностью циклическая частота F_{a1} первого толщинного антирезонанса;

числовые значения $Z_{el}(F_{r1})$ и $Z_{el}(F_{r2})$ электрического импеданса диска на частотах первого и второго электромеханического резонанса, определенные с точностью до десятых долей ома;

числовое значение динамической электрической емкости C_d^ε , которая, в принципе должна определяться на бесконечно большой частоте, когда силы инерции обеспечат режим постоянства (равенства нулю) механических деформаций. В реальной ситуации C_d^ε определяется через модуль электрического импеданса $Z_{el}(F^\varepsilon)$, где $F^\varepsilon \geq (F_{r1} + F_{r2})/2$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Порядок обработки экспериментальных данных.

1. По известному значению C_d^ε определяется диэлектрическая проницаемость

$$\chi_{33}^\varepsilon = \frac{\alpha C_d^\varepsilon}{\pi R^2}, \text{ Ф/м.}$$

2. По известному значению частоты первого толщинного электромеханического антирезонанса F_{a1} определяется модуль упругости

$$c_{33}^D = \rho_0 (2\alpha F_{a1})^2, \text{ Па.}$$

3. По известным числовым значениям частот F_{r1} и F_{a1} определяется их отношение $\eta = F_{r1}/F_{a1}$ и квадрат коэффициента электромеханической связи для толщинных колебаний пьезокерамического диска

$$K_{33}^2 = \frac{(\pi\eta/2)}{\text{tg}(\pi\eta/2) - (\pi\eta/2)}.$$

4. По известным значениям K_{33}^2 и c_{33}^D определяется модуль упругости

$$c_{33}^E = \frac{c_{33}^D}{1 + K_{33}^2}, \text{ Па.}$$

5. По известным значениям K_{33}^2 , χ_{33}^ε и c_{33}^E определяется пьезомодуль

$$e_{33} = K_{33} \sqrt{\chi_{33}^\varepsilon c_{33}^E}, \text{ Кл/м}^2.$$

6. По известным значениям $Z_{el}(F_{r1})$ и $Z_{el}(F_{r2})$ электрического импеданса диска на частотах первого и второго электромеханического резонанса определяются механические добротности

$$Q_{mj}^{(z)} = \frac{K_{33}^2 \Psi(\Omega_{rj})}{2Z_{el}(F_{rj})\Omega_{rj}C_d^e(1 + K_{33}^2)}, \quad j = 1; 2,$$

где

$$\Psi(\Omega_{rj}) = \frac{2tg(\gamma_j\alpha/2)}{(1 + K_{33}^2)(\gamma_j\alpha/2)} + \frac{1 - \sin(\gamma_j\alpha)/(\gamma_j\alpha)}{\cos^2(\gamma_j\alpha/2)};$$

$$\Omega_{rj} = 2\pi F_{rj}; \quad \gamma_j = \Omega_{rj}/\sqrt{c_{33}^D/\rho_0}.$$

7. По известным добротностям $Q_{mj}^{(z)}$ определяются коэффициенты затухания $\beta_j^{(z)}$ (непер, деленный на метр) в области высоких частот

$$\beta_j^{(z)} = \frac{\gamma_j}{2Q_{mj}^{(z)}}, \quad \text{Нп/м}, \quad j = 1; 2.$$

8. По известным коэффициентам затухания $\beta_j^{(z)}$ на частотах F_{rj} определяются структурные коэффициенты $\delta_1^{(z)}$ и $\delta_2^{(z)}$ в области высоких частот

$$\delta_1^{(z)} = \frac{\beta_1^{(z)}F_{r2}^4 - \beta_2^{(z)}F_{r1}^4}{F_{r1}^2F_{r2}^4 - F_{r2}^2F_{r1}^4}, \quad \delta_2^{(z)} = \frac{\beta_2^{(z)}F_{r1}^4 - \beta_1^{(z)}F_{r2}^4}{F_{r1}^2F_{r2}^4 - F_{r2}^2F_{r1}^4}.$$

9. По известным структурным коэффициентам $\delta_1^{(z)}$ и $\delta_2^{(z)}$ строится частотная зависимость коэффициента затухания $\beta^{(z)} = \delta_1^{(z)}f^2 + \delta_2^{(z)}f^4$ в области высоких частот и определяется частотная зависимость механической добротности в этом частотном диапазоне

$$Q_m^{(z)}(f) = \frac{\pi f}{v^D(\delta_1^{(z)}f^2 + \delta_2^{(z)}f^4)},$$

где $v^D = \sqrt{c_{33}^D/\rho_0}$ – скорость распространения плоских волн сжатия-растяжения в направлении вектора электрической поляризации пьезоэлектрического диска.

10. По известному значению динамической электрической емкости C_d^* определяется диэлектрическая проницаемость χ_{33}^e . Выполняется проверка на соответствие с ранее определенными значениями χ_{33}^e и K_{33}^2 , поскольку $\chi_{33}^* = \chi_{33}^e(1 + K_{33}^2)$. В случае существенного расхождения расчетной величины χ_{33}^* со значением χ_{33}^* , которое определено из эксперимента, необходимо проанализировать ситуацию и, в случае необходимости, повторить измерения.

11. По известным значениям частот f_{r1} и f_{r2} находится отношение $\xi_{21} = f_{r2}/f_{r1}$, и по этому отношению из таблицы 1 [13] находится параметр k и числовое значение корня x_1 .

12. По известному значению x_1 определяется модель упругости

$$c_{11} = \rho_0(2\pi Rf_{r1}/x_1)^2, \quad \text{Па.}$$

13. По известным величинам c_{11} и k определяется модуль упругости

$$c_{12} = kc_{11}, \quad \text{Па.}$$

14. По известным значениям c_{11} , c_{12} и c_{33}^E определяются модули упругости

$$c_{12}^E = \frac{c_{33}^E}{2} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{c_{12}^E}{c_{33}^E}} \right), \quad \text{Па}; \quad c_{11}^E = c_{11} + \frac{(c_{12}^E)^2}{c_{33}^E}, \quad \text{Па.}$$

15. По известному значению параметра k и измеренной частоте f_{a1} первого электромеханического антирезонанса определяется квадрат коэффициента электромеханической связи в режиме радиальных (планарных) колебаний пьезокерамического диска

$$K_{31}^2 = \frac{1}{2} \left[1 - k - \frac{\zeta_1 J_0(\zeta_1)}{J_1(\zeta_1)} \right],$$

где $\zeta_1 = x_1 f_{a1}/f_{r1}$.

16. По известным значениям K_{31}^2 , c_{11} и χ_{33}^* определяется пьезомодуль для режима планарных колебаний

$$e_{31}^* = -K_{31} \sqrt{c_{11} \chi_{33}^*}, \quad \text{Кл/м}^2.$$

17. По известным значениям e_{31}^* , e_{33} , c_{12}^E и c_{33}^E определяется пьезомодуль

$$e_{31} = e_{31}^* + e_{33} c_{12}^E / c_{33}^E, \quad \text{Кл/м}^2.$$

18. По известным значениям электрического импеданса диска $Z_{el}(f_{r1})$ и $Z_{el}(f_{r2})$ на частотах первого и второго электромеханического резонанса радиальных колебаний определяются добротности

$$Q_{mj}^{(\rho)} = \frac{R \left[(x_j^2 + k - 1) J_1(x_j) - k x_j J_0(x_j) \right]}{4 x_j v C_d^* K_{31}^2 J_1(x_j) Z_{el}(f_{rj})}, \quad j = 1; 2,$$

где x_j – числовое значение j -го корня [8];

$v = \sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – скорость распространения радиальных (планарных) колебаний в пьезокерамическом диске, определенная без учета потерь на вязкое трение.

19. По известным добротностям $Q_{m1}^{(\rho)}$ и $Q_{m2}^{(\rho)}$ по аналогии с процедурами п.п. 7 – 9 выполняется оценка частотной зависимости механической добротности в области средних частот.

20. По известным значениям материальных параметров пьезокерамики рассчитывается диэлектрическая проницаемость

$$\chi_{33}^\sigma = \chi_{33}^e (1 + \Delta\chi_{33}^\sigma), \quad \text{Ф/м.}$$

где

$$\Delta\chi_{33}^\sigma = \frac{2e_{31}^2 c_{33}^E - 4e_{31} e_{33} c_{12}^E + e_{33}^2 (c_{11}^E + c_{12}^E)}{\chi_{33}^e \left[c_{33}^E (c_{11}^E + c_{12}^E) - 2(c_{12}^E)^2 \right]}.$$

Рассчитанное значение χ_{33}^σ сравнивается со значением χ_{33}^σ , которое получено в результате измерения емкости C_d^σ на измерительном приборе. В слу-

чае большого расхождения числовых значений диэлектрической проницаемости χ_{33}^{σ} выполняется

анализ предыдущих вычислений, и, если это необходимо, выполняются новые измерения.

Результаты экспериментального определения материальных констант пьезокерамики приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментального определения материальных констант пьезокерамики

Входящие величины		Выходящие величины	
параметр	значение	параметр	значение
Материал	керамика типа ЦТС	Частота f_{a1} , Гц	$35,695 \cdot 10^3$
Радиус диска R , м	$33 \cdot 10^{-3}$	Частота f_{a2} , Гц	$84,530 \cdot 10^3$
Толщина диска a , м	$3 \cdot 10^{-3}$	Плотность ρ_0 , кг/м ³	7428
Статическая емкость C_d^{σ} , Ф	$16,68 \cdot 10^{-9}$	Модуль упругости c_{33}^E , ГПа	105,4
Частота F_{r1} , Гц	$641,748 \cdot 10^3$	Модуль упругости c_{11}^E , ГПа	99,32
Частота F_{r2} , Гц	$1516,364 \cdot 10^3$	Модуль упругости c_{12}^E , ГПа	50,46
Частота F_{a1} , Гц	$714,546 \cdot 10^3$	Пьезомодуль e_{33} , Кл/м ²	13,049
Модуль $Z_{el}(F_{r1})$, Ом	3,895	Пьезомодуль e_{31} , Кл/м ²	- 4,953
Модуль $Z_{el}(F_{r2})$, Ом	2,282	Диэл. проницаемость χ_{33}^{ϵ} , Ф/м	$5,477 \cdot 10^{-9}$
Частота f_{r1} , Гц	$31,906 \cdot 10^3$	Добротность $Q_{m1}^{(z)}$	48,481
Частота f_{r2} , Гц	$82,840 \cdot 10^3$	Добротность $Q_{m1}^{(\rho)}$	204,786

5. ВЫВОДЫ

Основные результаты настоящей статьи можно зафиксировать следующим образом.

1. Предложена методика экспериментального определения материальных констант пьезокерамики, которая позволяет в рамках эксперимента на одном образце определить три (из четырех не равных друг другу) модуля упругости c_{11}^E , c_{12}^E и c_{33}^E , два

(из двух не равных друг другу) пьезомодуля e_{31} и e_{33} , и одно из двух не равных друг другу значение диэлектрической проницаемости χ_{33}^{ϵ} .

2. Впервые в практике измерения материальных констант пьезокерамики был поставлен и разрешен вопрос об определении частотной зависимости уровня потерь энергии в объеме колеблющейся пьезокерамики.

Methodology of Determination of Physical and Mechanical Parameters of Piezoelectric Ceramics

O.N. Petrishchev¹, C.V. Bazilo²

¹ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Peremogy Ave., 03056 Kyiv, Ukraine

² Cherkasy State Technological University, 460, Shevchenko Str., 18006 Cherkasy, Ukraine

The final goal of mathematical modeling of the vibrating piezoelectric elements physical condition is a qualitative and quantitative description of characteristics and parameters of existing electrical and elastic fields. It is clear that to obtain meaningful and reliable quantitative estimates of the physical condition parameters of the piezoelectric (piezoceramic) element is not possible without reliable data on the values of the materials physical and mechanical constants. Method of material constants experimental determination of piezoelectric ceramics, which delivers reliable values of at least three modules of elasticity, two elements of the matrix of piezoelectric coefficients and one element of the matrix of dielectric constants is build. For the first time in the practice of material constants of piezoelectric ceramics measurement the question of determination of the frequency dependence of the energy level losses in a volume of oscillating piezoceramics is raised and resolved.

Keywords: Thin disk, Piezoelectric ceramics, Electrical impedance, Physical and mechanical constants.

Методика визначення фізико-механічних параметрів п'єзоелектричної керамікиО.М. Петрищев¹, К.В. Базіло²¹ *Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Перемоги, 37, 03056 Київ, Україна*² *Черкаський державний технологічний університет, вул. Шевченка, 460, 18006 Черкаси, Україна*

Кінцевою метою математичного моделювання фізичного стану п'єзокерамічних елементів, що коливаються, є якісний і кількісний опис характеристик і параметрів існуючих в них електричних і пружних полів. Абсолютно ясно, що отримання змістовних і достовірних кількісних оцінок параметрів фізичного стану п'єзоелектричних (п'єзокерамічних) елементів не представляється можливим без достовірних даних про величини фізико-механічних констант матеріалів. Запропоновано методику експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, яка дозволяє в рамках експерименту на одному зразку визначити три (з чотирьох не рівних один одному) модулі пружності, два (з двох не рівних один одному) п'єзомодулі, і одне з двох не рівних один одному значення діелектричної проникності. Вперше на практиці вимірювання матеріальних констант п'єзокераміки було поставлено і вирішено питання про визначення частотної залежності рівня втрат енергії в об'ємі п'єзокераміки, що коливається.

Ключові слова: Тонкий диск, П'єзокераміка, Електричний імпеданс, Фізико-механічні константи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alfredo Vazquez Carazo, *Actuators* **5**, 12 (2016).
2. Y Yuanmao, KW Eric Cheng, Kai Ding, *IEEE T. Power Electron.* **2** (2012).
3. Yu-Hsiang Hsu, Chih-Kung Lee, Wen-Hsin Hsiao, *IEEE T. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* **52**, 10 (2005).
4. Prasad Anipireddy, Challa Babu, *Advances in Robotics & Automation* **3**, 120 (2013).
5. В.М. Климашин, В.Г. Никифоров, А.Я. Сафронов, В.К. Казаков, *Компоненты и технологии*, 1 (2004).
6. Chang-Hua Lin, Ying Lu, Huang-Jen Chiu, Chung-Lun Ou, *IEEE T. Industrial Electron.* **54** No 2, 1024 (2007).
7. В.С. Дидковский, О.Н. Петрищев, А.Н. Шаблатович, *Электроника и связь*, 22 (2004).
8. О.Н. Петрищев, К.В. Базіло, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, **3**, 24–35 (2016).