

УДК 53.08  
doi:10.21685/2307-5538-2022-3-9

## МЕТОД «РЕЗОНАНС–АНТИРЕЗОНАНС» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИКОВ

А. Е. Журина<sup>1</sup>, Н. С. Емельянов<sup>2</sup>, Е. А. Печерская<sup>3</sup>, А. В. Фимин<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup>gelya.zhurina@mail.ru, <sup>2</sup>emelianoff.nikita@gmail.com, <sup>3</sup>pea1@list.ru, <sup>4</sup>mr.lotus@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Пьезоэлектрические материалы являются перспективными для применения в датчиках, для контроля динамических процессов в качестве первичных преобразователей информации измерительных и управляющих систем. Пьезомодуль позволяет формализовать взаимосвязи между диэлектрическими и упругими свойствами материала, что указывает на актуальность исследования методов его определения. *Материалы и методы.* Исследованы электрофизические параметры образцов материалов с пьезомягкой и пьезожесткой модой методом «резонанс–антирезонанс». *Результаты.* Выполнен анализ применимости метода «резонанс–антирезонанс» для образцов с пьезомягкой и пьезожесткой модой, при котором в образцах возбуждаются соответствующие образцу моды колебаний. По измеренным значениям характерных частот, а также емкости образцов рассчитаны величины всех упругих пьезоэлектрических и диэлектрических констант. *Выводы.* Подтверждена применимость метода «резонанс–антирезонанс» для определения электрофизических параметров пьезоэлектриков как у материалов с пьезомягкими модами, так и с пьезожесткими. Показано, что полный набор констант, полученный для образца одной формы, отличается от образца из того же материала, но другой формы. Это обусловлено флуктуацией свойств при переходе от пьезоэлемента одной геометрии к пьезоэлементу с другой геометрией из-за разного уровня их поляризации, разброса степени их структурной неоднородности.

**Ключевые слова:** пьезоэлектрик, метод «резонанс–антирезонанс», пьезоэлектрические константы, комплексная проводимость, частота

**Для цитирования:** Журина А. Е., Емельянов Н. С., Печерская Е. А., Фимин А. В. Метод «резонанс–антирезонанс» для определения электрофизических параметров пьезоэлектриков // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 76–82. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-9

## THE "RESONANCE–ANTIRESONANCE" METHOD FOR DETERMINING THE ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF PIEZOELECTRICS

A.E. Zhurina<sup>1</sup>, N.S. Emelyanov<sup>2</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>3</sup>, A.V. Fimin<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup>gelya.zhurina@mail.ru, <sup>2</sup>emelianoff.nikita@gmail.com, <sup>3</sup>pea1@list.ru, <sup>4</sup>mr.lotus@mail.ru

**Abstract.** *Background.* Piezoelectric materials are promising for use in sensors, for monitoring dynamic processes as primary information converters of measuring and control systems. The piezomodule makes it possible to formalize the relationship between the electrical and elastic properties of the material, which indicates the relevance of the study of methods for its determination. *Materials and methods.* The electrophysical parameters of samples of materials with piezo-soft and piezo-hard modes are investigated by the "resonance–antiresonance" method. *Results.* The analysis of the applicability of the "resonance–antiresonance" method for samples with piezo-soft and piezo-hard modes, in which the oscillation modes corresponding to the sample are excited in the samples, is performed. The values of all elastic piezoelectric and dielectric constants are calculated from the measured values of the characteristic frequencies, as well as the capacitance of the samples. *Conclusions.* The applicability of the "resonance–antiresonance" method for determining the electrophysical parameters of piezoelectrics both in materials with piezo-soft modes and with piezo-rigid ones is confirmed. It is shown that the complete set of constants obtained for a sample of one form differs from a sample of the same material, but of a different form. This is due to the fluctuation of properties during the transition from a piezoelectric element of one geometry to a piezoelectric element with another geometry due to the different level of their polarization, the spread of the degree of their structural heterogeneity.

**Keywords:** piezoelectric, the method of "resonance-antiresonance", piezoelectric constants, complex conductivity, frequency

**For citation:** Zhurina A.E., Emelyanov N.S., Pecherskaya E.A., Fimin A.V. The "resonance-antiresonance" method for determining the electrophysical parameters of piezoelectrics. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):76–82. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-9

Перспективные пьезоэлектрические материалы находят широкое применение в пьезоэлектрических преобразователях и датчиках, для контроля динамических процессов в качестве первичных преобразователей информации измерительных и управляющих систем [1]. Для применения пьезоэлектрических материалов в измерительной технике важно сочетание высокой эффективности со стабильностью характеристик при внешних воздействиях [2]. Свойства пьезоэлектрических кристаллов и пьезоэлектриков на основе различных химических соединений зависят от большого набора взаимосвязанных параметров, к которым относится температура Кюри, величины пьезоэлектрических, упругих и диэлектрических констант, стабильность от температуры, давления и других влияющих факторов [3]. Это указывает на необходимость системного выбора пьезоэлектрического материала, наилучшим образом подходящего для использования в измерительной технике. Поэтому актуальна задача изучения методов исследования электрофизических параметров пьезоэлектриков.

В электрическом поле диэлектрикам присущи различные электромеханические эффекты, так как при деформации кристалла в нем возникают упругие напряжения. Физической причиной электромеханических эффектов являются микроскопические смещения электрических зарядов в приложенном электрическом поле, поскольку электромеханические эффекты сопровождают электрическую поляризацию. Анизотропия пьезоэлектрических материалов приводит к тому, что для описания их электромеханических свойств необходимо использовать несколько компонент пьезомодулей [4]. Пьезомодуль является важным электрофизическим параметром пьезоматериала, с помощью которого описывается взаимосвязь между диэлектрическими и упругими свойствами материала. Помимо пьезомодуля существует ряд других, не менее важных параметров. Наиболее распространен следующий набор параметров пьезоматериала [5]:

$d$  ( $d_{33}$ ,  $d_{31}$ ) – пьезомодули (по направлению рабочих деформаций);

$K_{эм}$  ( $k_{33}$ ,  $k_{31}$ ) – коэффициенты электромеханической связи характеризуют эффективность преобразования электрической энергии, подводимой к материалу, в механическую;

$Y_{ij}$  – модуль Юнга определяет упругие и резонансные свойства материала;

$Q_m$  – характеризует потери энергии в материале на внутреннее трение, определяет эффективную ширину полосы пропускания, влияет на степень затухания колебательных процессов;

$\epsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость определяет полное сопротивление пьезоэлемента, характеризует диэлектрические и в конечном итоге емкостные свойства пьезоэлемента;

$\text{tg}\delta$  и  $\text{tg}\sigma$  – тангенсы углов диэлектрических и механических потерь характеризуют диэлектрические и механические потери в материале;

Известны различные методы определения констант упругости пьезоматериалов, которые целесообразно разделить на следующие группы: динамические методы, статические и квазистатистические [6].

Статистическими и квазистатическими методами обычно определяют только пьезомодули  $d_{31}$ ,  $d_{31}$ . Отличие этих методов от динамических методов заключается в том, что у первых частота статического и квазистатического нагружения испытываемых образцов ограничена сверху единицами Герц. Динамические методы позволяют определить ряд констант пьезоэлектрика с достаточно высокой точностью. В частности, к ним относится метод резонансных спектров, с помощью которого можно определить ряд упругих резонансов пьезоматериалов в сегнето- или парафазе в температурном диапазоне, включающем в себя температуру, близкую к температуре фазового перехода. Наибольшее распространение для сегнетоэлектриков и пьезоактивных материалов получил метод резонанса-антирезонанса [6]. Данный метод позволяет определить полный набор констант пьезоэлектрического материала. При использовании метода «резонанса–антирезонанса» (Р-А) в образцах возбуждают соответствующие образцу моды колебаний. По измеренным значениям характерных частот, а также емкости образцов рассчитывают величины всех упругих пьезоэлектрических и диэлектрических констант. В работе [7] из-

ложены сведения о методах и средствах измерения констант пьезокерамики и параметров пьезорезонатора. Подробно рассмотрен метод «резонанс – антирезонанс», на нескольких модах:

- низкочастотные пьезомягкие моды:
  - колебания пьезокерамических колец с аксиальной поляризацией;
  - сферически симметричные колебания тонкой сферической пьезокерамической оболочки;
  - продольные колебания стержня в поле, перпендикулярном его длине;
  - диски с радиальными колебаниями.
- высокочастотные пьезомягкие моды:
  - толщинные колебания пластин в электрическом поле, перпендикулярном толщине.
- низкочастотные пьезожесткие моды:
  - продольные колебания стержня в поле параллельном его длине.
- высокочастотные пьезожесткие моды:
  - тонкая пластинка с продольными колебаниями по толщине;
  - пластинка со сдвиговыми колебаниями по толщине.

Моды в образце можно определить резонансным методом, в котором возбуждаются определенные акустические моды собственных колебаний образца [8]. В работе [9] при заданной нагрузке рассмотрена задача о вынужденных колебаниях для различных значений частоты. Переход через собственную частоту обнаруживается по изменению фазы всех характеристик. Таким образом, обычно фиксируется широкий интервал, содержащий собственную частоту. Последующее дробление этого интервала позволяет найти с высокой точностью, как саму собственную частоту, так и характеристики соответствующей формы колебаний.

Математической моделью, используемой в методе, служат выражения для комплексной проводимости или сопротивления, полученные из решения электромеханической задачи для случаев одномерных колебаний пьезоэлемента. Основным допущением модели является пренебрежение всеми видами потерь энергии [7]. Экспериментально метод основан на измерении частот, по которым рассчитываются упругие константы и коэффициент электромеханической связи. Для расчета пьезоконстант проводятся измерения низко- или высокочастотной емкости, определяющей диэлектрические свойства материала. Последние наряду с величинами модуля комплексной проводимости на резонансе используются для определения механической добротности.

В сегнетоэлектриках типа смещения ангармоническое взаимодействие между фононами является слабым, что подтверждается малостью констант затухания для мягких мод и расчетами ангармонических поправок к частотам мягких фононных мод пьезоматериалов [10]. Выбор независимых механических переменных определяется механическими условиями в направлениях, поперечных колебательному движению. В случае низкочастотных мод элементарный объем считается свободным в поперечном направлении. На высокочастотных модах элементарный объем зажат в поперечном направлении одномерного линейного или планарного колебательного движения. Электрические граничные условия определяются расположением поверхностей пьезоэлектриков и их формой. Для пьезоэлектрических мягких (пьезомягких) мод поверхности электродов параллельны направлению колебаний.

Удобным способом описания метода «резонанс – антирезонанс» представляется использование классификации, которая выполнена в соответствии с электрическими и механическими граничными условиями. Можно определить пьезоконстанты, исходя из комплексной проводимости  $Y$  для пьезомягких мод:

$$Y = j\omega \left[ 1 + \frac{k^2}{1 - k^2} I_d(\varphi) \right], \quad (1)$$

где  $I_d(\varphi)$  – функция, определяющая динамические свойства пьезоматериала;  $k$  – коэффициент связи, или из комплексного сопротивления  $Z$  для пьезожестких мод [7] согласно следующему выражению:

$$z = \frac{1}{j\omega C_0} \left[ 1 - k^2 I_d(\varphi) \right]. \quad (2)$$

Для определения констант на пьезомягких модах используется условие антирезонанса при  $Y = 0$ , для определения констант на пьезожестких модах применено условие  $Z \rightarrow \infty$ .

Для примера рассмотрим образец в форме таблетки, имеющей природу низкочастотных мод. Тогда комплексная проводимость будет определяться согласно выражению (1). В условии антирезонанса  $Y = 0$ , отсюда следует

$$1 + \frac{k^2}{1 - k^2} I_D(\varphi) = 0. \quad (3)$$

При определении коэффициента связи воспользуемся заменой [7]

$$\frac{f_p}{f_s} = 1 + \frac{\Delta f}{f_s}, \quad (4)$$

где  $f_s$  – частота динамического (последовательного) резонанса,  $f_p$  – частота параллельного резонанса (антирезонансная частота),  $\Delta f = f_p - f_s$ . Тогда коэффициент связи будет равен

$$k = \sqrt{1 + \frac{\Delta f}{f_s}}, \quad (5)$$

пьезомодуль можно определить из коэффициента связи

$$d_{31} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta f}{f_s}\right) S_{11}^E (1 - \sigma) \epsilon_{33}^T}, \quad (6)$$

где  $S_{11}^E$  – упругая константа материала;  $\epsilon_{33}^T$  – диэлектрическая константа;  $\sigma$  – коэффициент Пуассона.

В образце в форме таблетки, имеющего пьезожесткую моду, комплексная проводимость будет определяться по формуле (2). В условии антирезонанса  $Z \rightarrow \infty$ , отсюда следует

$$1 - k^2 I_D(\varphi) = 0. \quad (7)$$

При определении коэффициента связи воспользуемся заменой [7], тогда коэффициент связи будет равен

$$k^2 = \left( \frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right). \quad (8)$$

Пьезоэлектрическая константа будет равна

$$h_{33} = 2 f_p \sqrt{\frac{m}{C^S} \left( \frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right)}, \quad (9)$$

где  $m$  – масса образца;  $C^S$  – электрическая емкость образца,  $C^S = \frac{\epsilon_{33}^S \pi r^2}{t}$ , где  $r$  – радиус, а  $t$  – толщина образца. Тогда выражение для пьезоэлектрической константы будет иметь следующий вид:

$$h_{33} = 2 f_p \sqrt{\frac{m}{\frac{\epsilon_{33}^S \pi r^2}{t}} \left( \frac{\pi f_s}{2 f_p} \right) \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \Delta f}{2 f_p} \right)}. \quad (10)$$

Для проверки метода использованы данные справочника [11] для различных пьезокерамических материалов. Получившиеся данные представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

## Образцы с пьезомягкой модой

Образец	$-d_{31}(10^{-12})$ , Кл/Н	$-d_{31}^*(10^{-12})$ , Кл/Н	$\epsilon_{33}^r(10^{-12})$ , Ф/м	$S^E(10^{-12})$ , м <sup>2</sup> /Н	$\sigma$	$f_s$ , кГц	$f_p$ , кГц
ЦТС-19	175	177	192	15,8	0,38	2,5768	0,6768
ЦТС-24М	100	109	107	13,0	0,31	2,6234	0,6554
VA800	123	119	147	12,8	0,30	2,6304	0,5404
ЦТБС-3	158	161	263	11,1	0,30	2,6304	0,6122
ПКВ-820	110	113	128	12,3	0,32	2,6165	0,3165

Примечание:  $d_{31}$  – пьезомодуль, полученный по формуле (6).

Таблица 2

## Образцы с пьезожесткой модой

Образец	$h_{33}$	$h_{33}^*$	$\epsilon_{33}^s$ , Ф/м	$\sigma$	$f_s$ , кГц	$f_p$ , кГц
DL-31	18,8	17,89	265	0,22	3,0545	0,1275
DL-40	52,5	53,61	210	0,29	3,0970	0,1940
DL-43	27,9	25,93	550	0,31	3,1131	0,2131
DL-45	23,6	24,32	680	0,32	3,1212	0,2312
DL-47	24,6	22,17	870	0,31	3,1131	0,3101

Примечание:  $h_{33}$  – пьезоэлектрическая константа, полученная по формуле (10), при расчетах масса бралась равной  $m = 0,016$  кг, радиус образца  $r = 0,02$  м, толщина  $t = 0,001$  м.

В процессе проверки формулы (10) возникла задача подбора размера и веса образцов так, чтобы пьезоэлектрические константы были близки по значениям. При подсчете констант методом «резонанс–антирезонанс» значения, полученные для образца одной формы, будут отличаться от значений пьезокерамического образца других размеров.

Таким образом, изложенный метод является рабочим, он позволяет выполнять определение констант как у материалов с пьезомягкими модами, так и с пьезожесткими. Однако проверка показала, что константы у материалов с пьезожесткими модами методом «резонанс–антирезонанс» определять сложнее, несмотря на это, метод зарекомендовал себя хорошо, к тому же большинство пьезокерамических материалов имеют пьезомягкую моду.

Метод подтвержден ГОСТ Р 8.936–2017<sup>1</sup>, в котором пьезоэлектрический модуль определяется по формуле

$$|d_{31}| = \frac{0,188K_p 10^{-5}}{rf_s} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^r / \epsilon_0}{\rho}}, \quad (11)$$

где  $K_p$  – показатель эффективности преобразования электрической энергии в механическую энергию или преобразования механической в электрическую,  $\rho$  – измеренная плотность образца, определяемая методом гидростатического взвешивания в октане.

### Заключение

Рассмотренный метод «резонанс–антирезонанс» может быть использован для получения полного набора электрофизических параметров пьезоэлектрика. Но полный набор констант, полученный для образца одной формы, будет отличаться от образца из того же материала, но другой формы. Это происходит потому, что флуктуация свойств при переходе от пьезоэлемента одной геометрии к пьезоэлементу с другой геометрией значительна из-за разного уровня их поляризации, разброса степени их структурной неоднородности. В результате константы, рассчитанные по резонансным частотам соответствующих мод колебаний таких пьезоэлементов, являются характеристиками того типа пьезоэлементов, на которых измеря-

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.936–2017. Государственная система обеспечения единства измерений. Пьезокерамические материалы. Диэлектрические, пьезоэлектрические и упругие характеристики при температуре 25 °С.

лись частоты резонансов. Поэтому полный набор констант пьезокерамики, рассчитываемый по методу «резонанс–антирезонанс», существенно отличается от полного набора материальных констант конкретного состава пьезокерамики. В этом смысле и заключается несовместимость значений набора констант пьезоэлементов разной геометрии и материальных констант конкретного состава пьезокерамики, а также недостоверность результатов, полученных методом «резонанс–антирезонанс».

### Список литературы

1. Богуш М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. М. : Техносфера, 2014. 312 с.
2. Печерская Е. А. Метрологические аспекты исследования активных диэлектриков для микро- и наноиндустрии // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 41–44.
3. Печерская Е. А., Соловьев В. А., Метальников А. М. [и др.]. Контроль временной нестабильности диэлектрических параметров сегнетоэлектриков // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2013. № 2. С. 84–88.
4. Рез И. С., Поплавко Ю. М. Диэлектрики. Основные свойства и применения в электронике. М. : Радио и связь, 1989. 288 с.
5. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В. [и др.]. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб. : Университет ИТМО, 2017. 134 с.
6. Копьян В. А., Соловьев А. Н., Шевцов С. Н. Методы и алгоритм определения полного набора совместимых материальных констант пьезокерамических материалов. Ростов н/Д. : Изд-во ЮФУ, 2008. 144 с.
7. Ганопольский В. В., Касаткин Б. А., Легуша Ф. Ф. [и др.]. Пьезокерамические преобразователи : справочник. Л. : Судостроение, 1984, 256 с.
8. Гайдуков Ю. П., Данилова Н. П., Сапожников О. А. Моды колебаний изотропного диска, слабо зависящие от его толщины // Акустический журнал. 1999. Т. 45, № 2. С. 195–203.
9. Гринченко В. Т., Мелешко В. В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев : Наук. думка, 1981. 284 с.
10. Квятковский О. Е. Квантовые эффекты в виртуальных и низкотемпературных сегнетоэлектриках (Обзор) // Физика твердого тела. 2001. Т. 43, вып. 8
11. Справочник пьезокерамических материалов различных фирм. Зеленоград : НИИ «Элпа».

### References

1. Bogush M.V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrouprugikh modeley = Design of piezoelectric sensors based on spatial electro-elastic models*. Moscow: Tekhnosfera, 2014:312. (In Russ.)
2. Pecherskaya E.A. Metrological aspects of research of active dielectrics for micro- and nanoindustry. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and microsystem technology*. 2007;(7):41–44. (In Russ.)
3. 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 = Izvestia of higher educational institutions. Electronics*. 2013;(2):84–88. (In Russ.)
4. Rez I.S., Poplavko Yu.M. *Dielektriki. Osnovnye svoystva i primeneniya v elektronike = Basic properties and applications in electronics*. Moscow: Radio i svyaz', 1989:288. (In Russ.)
5. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V. et al. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy = Actuators and systems for micro-displacements*. Saint Petersburg: Universitet ITMO, 2017:134. (In Russ.)
6. Kop'yan V.A., Solov'ev A.N., Shevtsov S.N. *Metody i algoritm opredeleniya polnogo nabora sovmeshtimyykh material'nykh konstant p'ezokeramicheskikh materialov = Methods and algorithm for determining the complete set of compatible material constants of piezoceramic materials*. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2008:144. (In Russ.)
7. Ganopol'skiy V.V., Kasatkin B.A., Legusha F.F. et al. *P'ezokeramicheskie preobrazovateli: spravochnik = Piezoceramic converters : handbook*. Leningrad: Sudostroenie, 1984:256. (In Russ.)
8. Gaydukov Yu.P., Danilova N.P., Sapozhnikov O A. Modes of oscillations of an isotropic disk, weakly depending on its thickness. *Akusticheskiy zhurnal = Acoustic Journal*. 1999;45(2):195–203. (In Russ.)
9. Grinchenko V.T., Meleshko V.V. *Garmonicheskie kolebaniya i volny v uprugikh telakh = Harmonic oscillations and waves in elastic bodies*. Kiev: Nauk. dumka, 1981:284. (In Russ.)
10. Kvyatkovskiy O.E. Quantum effects in virtual and low-temperature ferroelectrics (Review). *Fizika tverdogo tela = Solid state Physics*. 2001;43(8). (In Russ.)
11. *Spravochnik p'ezokeramicheskikh materialov razlichnykh firm = Directory of piezoceramic materials of various companies*. Zelenograd: NII «Elpa». (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Ангелина Евгеньевна Журина**

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: gelya.zhurina@mail.ru

**Angelina E. Zhurina**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Никита Сергеевич Емельянов**

магистрант,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: emelianoff.nikita@gmail.com

**Nikita S. Emelyanov**

Master degree student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**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  
and 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 25.03.2022**

**Поступила после рецензирования/Revised 26.04.2022**

**Принята к публикации/Accepted 23.05.2022**