

## ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.3.032, 666.638

DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-10

*С. А. Москалев, И. Н. Чебурахин, В. С. Волков, В. В. Кикот, Г. А. Кошкин***ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТИ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ  
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДАТЧИКОВ  
МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН***S. A. Moskalev, I. N. Cheburakhin, V. S. Volkov, V. V. Kikot, G. A. Koshkin***THE TEMPORAL STABILITY OF THE PIEZOCERAMIC  
SENSITIVE ELEMENTS CHARACTERISTICS  
FOR THE SENSORS OF MECHANICAL VALUES**

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Целью исследования является определение коэффициента старения характеристик чувствительных элементов пьезоэлектрических датчиков давления, изготовленных из материала – аналога ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ». **Материалы и методы.** Изготовлены пьезоэлементы, характеристики которых (емкость и тангенс угла диэлектрических потерь) измерялись при хранении в течение 79 дней. Выявлена зависимость характеристик от времени и определены коэффициенты старения. **Результаты.** Снижение емкости пьезоэлементов хорошо описывается логарифмической зависимостью (коэффициент корреляции равен 0,993). Снижение тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлементов описывается логарифмической зависимостью хуже (коэффициент корреляции равен 0,311). Поскольку диэлектрические потери пьезоматериала зависят от множества параметров внешней среды: температуры, влажности и т.д., то наиболее вероятная причина сильного разброса значений тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлементов во времени связана с отсутствием специальных условий хранения. **Выводы.** Из приведенных расчетов видно, что наиболее простой способ повышения временной стабильности параметров пьезоэлементов – предварительная выдержка в нормальных климатических условиях в течение не менее двух декад, т.е. 100 дней. При этом значение коэффициента старения характеристик пьезоэлемента уменьшается не менее, чем вдвое.

**A b s t r a c t. Background.** The object of the research is to determine the aging coefficient of the piezoelectric sensitive elements characteristics for pressure sensors made from a material – an analogue of PZT-83G. **Materials and methods.** The piezoelectric elements were made and their characteristics (capacitance and tangent of dielectric loss angle) were measured during 79 days storage. The dependence of characteristics on time is built and aging factors are determined. **Results.** The decrease in the capacitance of the piezoelectric elements is well described by the logarithmic dependence (the correlation coefficient is 0.993). Reducing the dielectric loss tangent of piezoelectric elements is described worse by the logarithmic dependence (the

correlation coefficient is 0.311). Since the dielectric losses of a piezoceramic material depend on a variety of environmental parameters: temperature, humidity, etc., the most likely reason for the strong variation of the tangent of the dielectric loss angle of piezoelectric elements over time is the lack of special storage conditions. **Conclusions.** From the above calculations it can be seen that the simplest way to increase the temporal stability of the parameters of piezoelements is preliminary exposure at a normal climatic conditions for at least two decades, ie, 100 days. Exposure At the same time, the value of the aging coefficient of the characteristics of the piezoelectric element is no less than twice reduced.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** пьезоэлектрический датчик, чувствительный элемент, пьезокерамика ЦТС-83Г, емкость, тангенс угла диэлектрических потерь.

**К e y w o r d s:** piezoelectric sensor, sensitive element, piezo-ceramic PZT-83G, capacitance, tangent of dielectric loss angle.

### Введение

В настоящее время для создания датчиков механических величин (ускорений, акустических давлений, быстропеременных давлений) широко применяется пьезоэлектрический принцип преобразования, а в качестве материала для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) используется пьезокерамика, отличающаяся высокой пьезочувствительностью.

Погрешности ЧЭ оказывают значительное влияние на метрологические характеристики датчика в целом и поэтому их снижению уделяется большое внимание при разработке и изготовлении современной датчиковой аппаратуры. Практически все виды погрешностей, характерных для ЧЭ датчиков механических величин, можно учесть и скомпенсировать последующей обработкой измерительного сигнала во вторичной измерительной аппаратуре. Исключением являются погрешности от нестабильности электрофизических параметров, вызванные деградационными процессами в материале ЧЭ [1–4]. В частности, пьезокерамические элементы сразу после изготовления подвержены снижению ряда основных параметров – емкости, тангенса угла диэлектрических потерь, пьезочувствительности, что необходимо учитывать при проектировании пьезоэлектрических датчиков [5].

Известно, что пьезокерамические материалы приобретают пьезоэлектрические свойства в макроскопическом масштабе только после приложения внешнего электрического поля – поляризации. Происходит упорядочение ориентации доменов спонтанной поляризации вдоль направления внешнего поля, сопровождающееся деформацией кристаллитов и их переходом в нестабильное состояние. Под действием этих факторов доменные границы смещаются – структура керамики разупорядочивается, переходя в более стабильное состояние [5–7].

Макроскопически старение сопровождается снижением пьезомодулей, диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, ростом частот резонанса и механической добротности. Известно [5], что изменение электрофизических характеристик в первом приближении происходит по логарифмическому закону

$$X = X_0 + K \lg \tau, \quad (1)$$

где  $X_0$  и  $X$  – начальное и текущее значение параметра;  $K$  – коэффициент старения за декаду;  $\tau$ , произв. ед. – время.

Длительные исследования показывают, что коэффициент старения не является постоянной величиной и уменьшается со временем также по логарифмическому закону. Поэтому полученное на первых декадах старения значение коэффициента старения является рамочным ограничением, задающим максимально возможную скорость старения.

Таким образом, знание коэффициента старения позволяет прогнозировать временное изменение параметров пьезокерамики и, следовательно, метрологических характеристик датчиков и преобразователей с ЧЭ на основе пьезокерамики. Логарифмический характер временной зависимости свойств пьезокерамики позволяет также использовать наиболее простой метод повышения временной стабильности – предварительное состаривание в течение нескольких декад.

В настоящей работе рассмотрено старение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пьезокерамического материала ЦТС-83Г (НКТБ «Пьезоприбор») и его аналога производства АО «НИИФИ».

Экспериментальная процедура. Измерение параметров проводили в нормальных климатических условиях (НКУ) через 1, 2, 9, 31, 45, 72 и 79 дней после изготовления. Полученные результаты позволяют оценить характер изменения и значения коэффициентов старения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь для рассмотренных материалов.

### Результаты и обсуждение

Полученные данные приведены на графиках (рис. 1, 2) и в табл. 1.

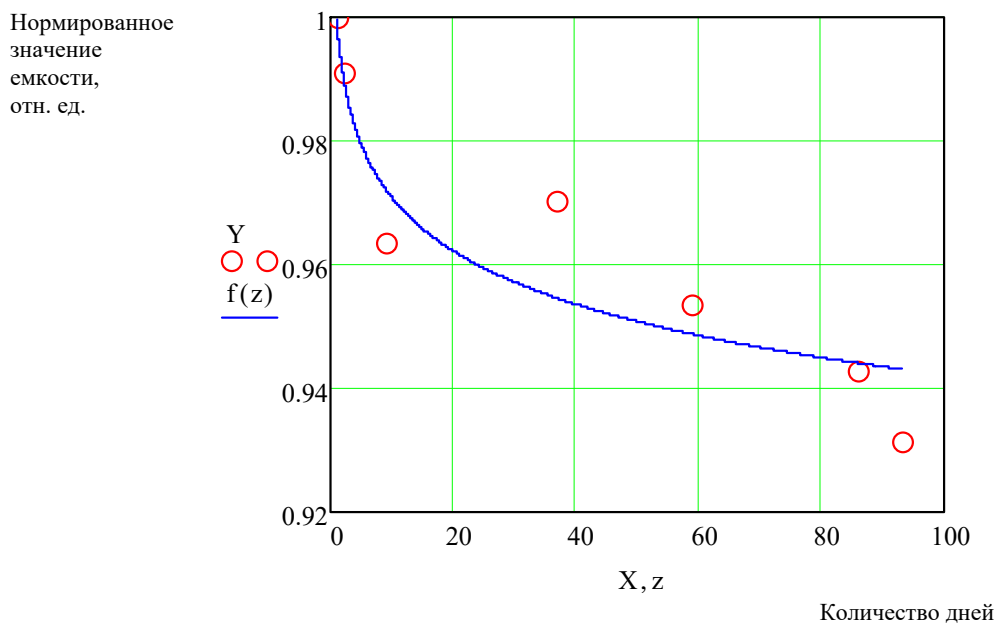


Рис. 1. Нормированное значение емкости пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ»

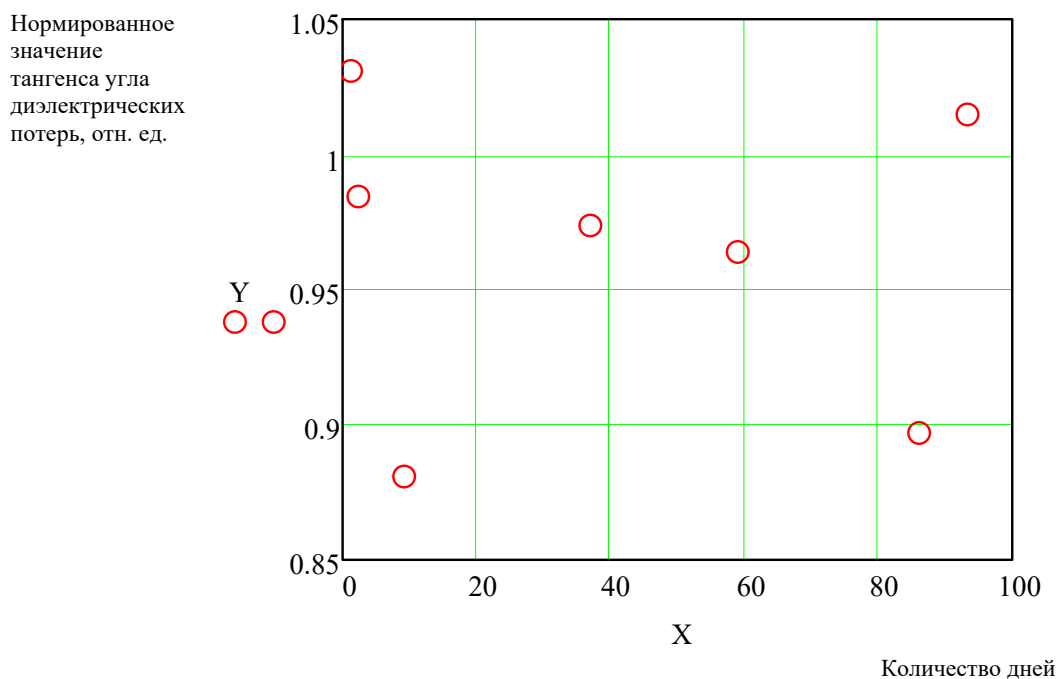


Рис. 2. Нормированное значение тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ»

Таблица 1

Экспериментальные данные по измеренным значениям емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  пьезоэлементов из материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ» и НКТЬ «Пьезоприбор»

Время, дн.	Аналог ЦТС-83Г (АО «НИИФИ»)				ЦТС-83Г (НКТЬ «Пьезоприбор»)			
	С, пФ	С отн.	$\operatorname{tg}\delta$	$\operatorname{tg}\delta$ , отн.	С, пФ	С отн.	$\operatorname{tg}\delta$	$\operatorname{tg}\delta$ , отн.
1	1680,0	1,0000	0,0200	1,0309	1681,0	1,0000	0,0220	1,0000
2	1665,0	0,9911	0,0191	0,9845	1668,0	0,9923	0,0211	0,9591
9	1619,0	0,9637	0,0171	0,8814	1648,0	0,9804	0,0210	0,9545
31	1630,0	0,9702	0,0189	0,9742	1642,0	0,9768	0,0210	0,9545
45	1602,0	0,9536	0,0187	0,9639	1644,0	0,9780	0,0207	0,9409
72	1584,0	0,9429	0,0174	0,8969	1624,0	0,9661	0,0197	0,8955
79	1565,0	0,9315	0,0197	1,0155	1579,0	0,9393	0,0210	0,9545

Аппроксимация данных рис. 1 логарифмической зависимостью в соответствие с (1) дает следующее выражение:

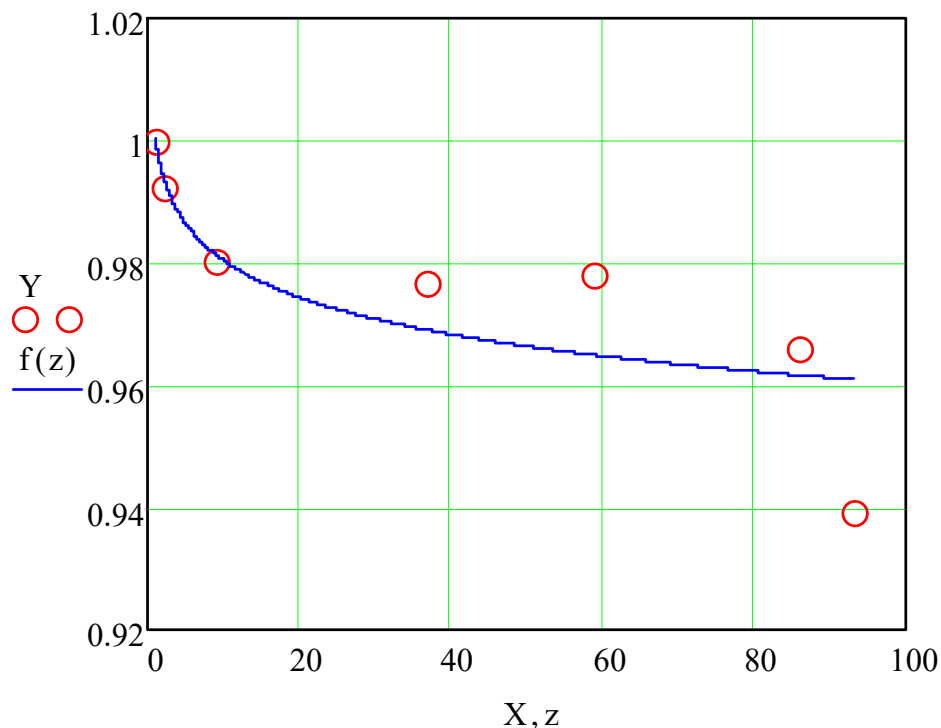
$$C = 0,999 - 0,029 \cdot \lg(n), \quad (2)$$

где  $C$  – емкость;  $n$  – количество дней после температурного воздействия. Коэффициент корреляции аналитической зависимости (2) и экспериментально полученных значений равен 0,993, что свидетельствует о достоверности предположения о логарифмическом законе изменения параметра пьезокерамического материала.

Аппроксимация экспериментальных данных рис. 2 логарифмической зависимостью (1) дает коэффициент корреляции 0,311, что говорит о недостаточной точности аппроксимации.

Для сравнения на рис. 3 и 4 приведены аналогичные зависимости для материала ЦТС-83Г производства НКТЬ «Пьезоприбор» [8]. Коэффициент корреляции для зависимости емкости от времени равен 0,828, для зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от времени – 0,735.

Нормированное значение емкости, отн. ед.



Количество дней

Рис. 3. Нормированное значение емкости пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства НКТЬ «Пьезоприбор»

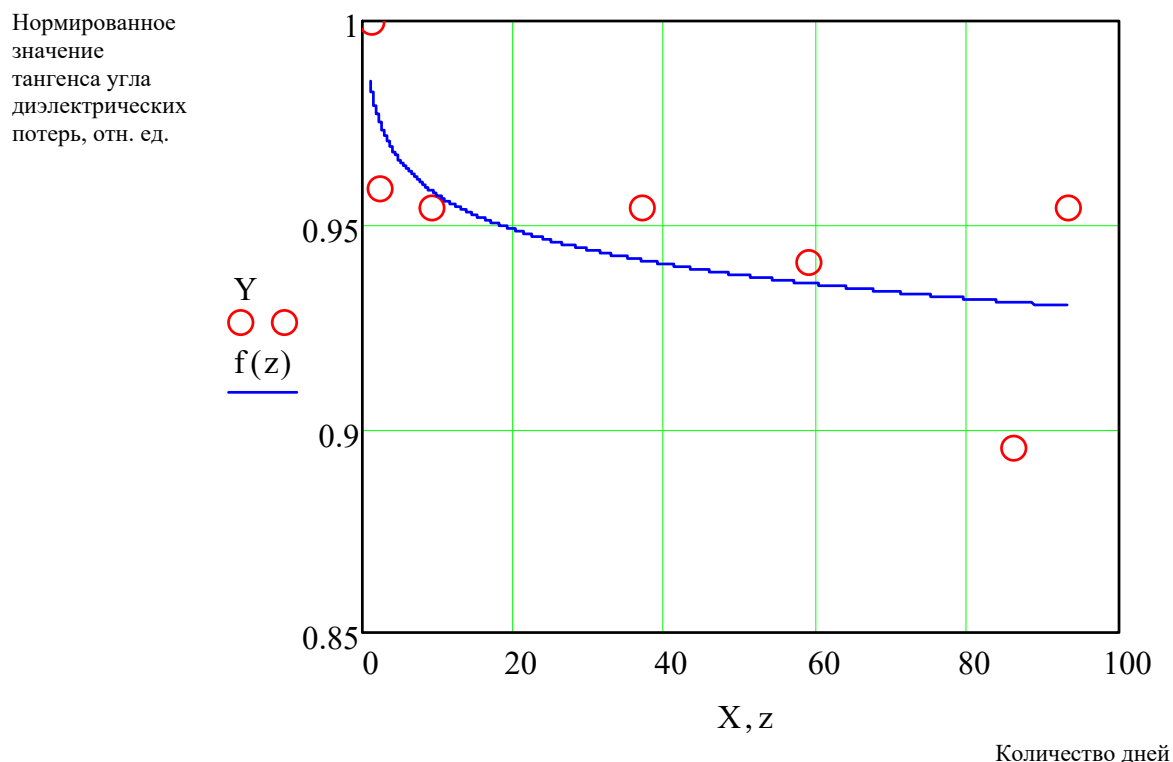


Рис. 4. Нормированное значение тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлемента из материала ЦТС-83Г производства НКТБ «Пьезоприбор»

Аппроксимация данных рис. 3 логарифмической зависимостью в соответствии с (1) дает следующее выражение:

$$C = 1,001 - 0,02 \lg(n), \quad (3)$$

а аппроксимация данных рис. 4 логарифмической зависимостью в соответствии с (1) дает следующее выражение:

$$\operatorname{tg} \delta = 0,985 - 0,028 \lg(n). \quad (4)$$

Из графиков на рис. 1–4 видно, что изменения соответствующих параметров у рассматриваемых материалов происходили синхронно, из чего следует вывод о единстве механизма структурной перестройки в процессе старения.

Снижение емкости пьезоэлементов из обоих пьезоматериалов хорошо описывается логарифмической зависимостью (1) (коэффициенты корреляции 0,993 и 0,828 для материалов НИИФИ и НКТБ «Пьезоприбор» соответственно), что свидетельствует о достоверности полученных для материала ЦТС-83Г производства АО «НИИФИ» экспериментальных данных. Зависимость значения тангенса угла диэлектрических потерь от времени для материала ЦТС-83Г производства НКТБ «Пьезоприбор» также аппроксимируется логарифмической зависимостью (1) с коэффициентом корреляции 0,735, при этом соответствующая зависимость для материала производства АО «НИИФИ» хотя и не имеет ярко выраженной логарифмической зависимости от времени, но в целом демонстрирует со временем снижение значения тангенса. По-видимому, худшая аппроксимация данной зависимости может быть объяснена тем, что диэлектрические потери пьезоматериала зависят от множества параметров внешней среды: температуры, влажности и т.д. Поэтому наиболее вероятная причина сильного разброса значений тангенса угла диэлектрических потерь пьезоэлементов АО «НИИФИ» во времени связана с отсутствием специальных условий хранения.

Рассчитанные значения коэффициентов старения и прогнозируемое изменение параметров пьезоэлементов через 10 лет хранения в НКУ сведены в табл. 2. В соответствии с работой [8] коэффициенты старения представляют собой множители перед логарифмом в выражениях (2)–(4). Как видно из табл. 2, коэффициенты старения электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь на превышают 3 % за декаду.

Как показывает расчет, предварительная выдержка пьезоэлементов в НКУ в течение первых двух декад старения позволит снизить прогнозируемое изменения параметров при хранении в НКУ в течение 10 лет до двух раз.

Таблица 2

Прогнозируемые значения изменения параметров пьезоэлементов

Материал	Параметр	Коэффициент старения за декаду, %	Прогнозируемое изменение параметров через 10 лет хранения в НКУ, %	
			После поляризации	После двух декад старения
Аналог ЦТС-83Г (АО «НИИФИ»)	Электрическая емкость	2,9	10,3	4,8
ЦТС-83Г (НКТБ «Пьезоприбор»)	Электрическая емкость	2,0	7,1	3,3
	Тангенс угла диэлектрических потерь	2,8	10,0	4,7

Полученные значения коэффициента старения диэлектрической проницаемости как величины, пропорционально связанной с электрической емкостью, и тангенса угла диэлектрических потерь, полученные для материала ЦТС-83Г и его аналога производства АО «НИИФИ», позволяют спрогнозировать изменение параметров пьезоэлементов при длительном хранении. Согласно [1] реальная скорость падения характеристик должна быть ниже из-за того, что сам коэффициент старения также уменьшается со временем по логарифмическому закону, из чего следует, что полученное приближение характеризует максимальное отклонение параметров при хранении.

#### Заключение

Из приведенных расчетов видно, что наиболее простой способ повышения временной стабильности параметров пьезоэлементов – предварительная выдержка в НКУ в течение не менее чем двух декад, т.е. 100 дней. Выдержка пьезоэлементов перед поставкой возможна только при плановом цикле производства, из-за чего требуется разработка методов ускоренного старения, основанных на количественной теории старения поляризованных сегнетоэлектриков, учитывающей структурные факторы и механизмы старения.

#### Библиографический список

1. Мельников, А. А. Система контроля состояния пьезоэлектрических датчиков давления / А. А. Мельников, Б. В. Цыпин, К. И. Баstryгин, В. В. Кикот // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 29–34
2. Баринов, И. Н. Повышение долговременной стабильности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давлений / И. Н. Баринов, В.С. Волков // Приборы. – 2010. – № 3. – С. 9–16.
3. Баринов, И. Н. Датчики давления на основе резонансного преобразователя с повышенной временной стабильностью метрологических и эксплуатационных характеристик / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Н. И. Баринов // Датчики и системы. – 2012. – № 10. – С. 6–9.
4. Баринов, И. Н. Использование высокоомных кремниевых тензорезисторов для повышения временной стабильности датчиков давления в системах управления и контроля / И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. П. Евдокимов, Д. А. Кудрявцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 1 (7). – С. 65–74.
5. Яффе, Б. Пьезоэлектрическая керамика / Б. Яффе, У.Р. Кук, Г. Яффе. – Москва : Мир, 1974. – 290 с.
6. Раппопорт, С. Л. Исследование процессов старения титаната бария / С. Л. Раппопорт, Л. И. Донцова // Кристаллография. – 1970. – Т. 15, № 2. – С. 384–386.
7. Смажеская, Е. Г. Пьезоэлектрическая керамика / Е. Г. Смажеская, Н. Б. Фельдман. – Москва : Советское радио, 1971. – 218 с.
8. Богуш, М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электротермоупругих моделей / М. В. Богуш. – Москва : Техносфера, 2014. – 312 с.

#### References

1. Mel'nikov A. A., Tsy-pin B. V., Bastrygin K. I., Kikot V. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4 (10), pp. 29–34. [In Russian]

2. Barinov I. N., Volkov V. S. *Pribory* [Instrumentation]. 2010, no. 3, pp. 9–16. [In Russian]
3. Barinov I. N., Volkov V. S., Barinov N. I. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2012, no. 10, pp. 6–9. [In Russian]
4. Barinov I. N., Volkov V. S., Evdokimov S. P., Kudryavtseva D. A. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 1 (7), pp. 65–74. [In Russian]
5. Yaffe B., Kuk U. R., Yaffe G. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Mir, 1974, 290 p. [In Russian]
6. Rappoport S. L., Dontsova L. I. *Kristallografiya* [Crystallography]. 1970, vol. 15, no. 2, pp. 384–386. [In Russian]
7. Smazhevskaya E. G., Fel'dman N. B. *P'ezoelektricheskaya keramika* [Piezoelectric ceramics]. Moscow: Sovetskoe radio, 1971, 218 p. [In Russian]
8. Bogush M. V. *Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektromouprugikh modeley* [Design of piezoelectric transducers based on the spatial Electrotechnology models]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 312 p. [In Russian]

**Москалев Сергей Александрович**

кандидат технических наук,  
заместитель генерального директора по качеству,  
развитию и технологиям,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: distorsion@rambler.ru

**Moskalev Sergey Aleksandrovich**

candidate of technical sciences,  
deputy general director for quality,  
development and technologies,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Чебурахин Игорь Николаевич**

главный технолог,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: distorsion@rambler.ru

**Cheburachin Igor Nikolaevich**

chief technologist,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Волков Вадим Сергеевич**

кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: distorsion@rambler.ru

**Volkov Vadim Sergeevich**

candidate of technical sciences, associate professor,  
senior scientist,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Кикот Виктор Викторович**

кандидат технических наук,  
начальник центра пьезопроизводства,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: distorsion@rambler.ru

**Kikot Viktor Viktorovich**

candidate of technical sciences,  
head of piezo production center,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Кошкин Глеб Александрович**

инженер-технолог,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail: distorsion@rambler.ru

**Koshkin Gleb Aleksandrovich**

processing engineer,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Исследование временной стабильности характеристик пьезокерамических чувствительных элементов датчиков механических величин / С. А. Москалев, И. Н. Чебурахин, В. С. Волков, В. В. Кикот, Г. А. Кошкин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 87–94. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-10.