

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АКАДЕМИЯ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ КОСМОНАВТИКИ имени К. Э. ЦИОЛКОВСКОГО
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНФОРМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ» РАН
(ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАН имени А. А. ДОРОДНИЦЫНА)
АО «УПКБ "ДЕТАЛЬ"», АО «РАДИОЗАВОД»
АО «ФНПЦ «ПО "СТАРТ" имени М. В. ПРОЦЕНКО», АО «НИИЭМП»
АО «ПНИЭИ», АО «НИИФИ», АО «НПП "РУБИН"»
ЕВРАЗИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени Л. Н. ГУМИЛЕВА
ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ТРУДЫ
МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО

Том 2

*Посвящается 80-й годовщине Победы
в Великой Отечественной войне*

ПЕНЗА 2025



Т78 Труды Международного симпозиума НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО. – 2025. – Т. 2. – 534 с.

Представлены доклады XXX Международного симпозиума «Надежность и качество», посвященного 80-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне, проходившего с 26 мая по 1 июня 2025 г. в г. Пензе.

Рассмотрены актуальные проблемы теории и практики повышения надежности и качества; эффективности внедрения инновационных и информационных технологий в фундаментальные научные и прикладные исследования, образовательные и коммуникативные системы и среды, экономику и юриспруденцию; методов и средств анализа и прогнозирования показателей надежности и качества приборов, устройств и систем, а также анализа непараметрических моделей и оценки остаточного ресурса изделий двойного назначения; ресурсосбережения; проектирования интеллектуальных экспертных и диагностических систем, систем управления и связи, интерактивных, телекоммуникационных сетей и сервисных систем; экологического мониторинга и контроля состояния окружающей среды и биологических объектов; исследования физико-технологических процессов в науке, технике и технологиях для повышения качества выпускаемых изделий радиопромышленности, приборостроения, аэрокосмического и топливно-энергетического комплексов, электроники и вычислительной техники и др.

Издание предназначено для студентов, аспирантов, ученых и научных сотрудников, заинтересованных в исследовании надежности и качества эффективных комплексных систем.

УДК 621.396.6:621.315.616.97:658:562

Оргкомитет благодарит за поддержку в организации и проведении Международного симпозиума и издании настоящих трудов Министерство науки и высшего образования РФ, Правительство Пензенской области, Академию проблем качества РФ, Российскую академию космонавтики имени К. Э. Циолковского, Российскую инженерную академию, ФИЦ ИУ РАН (Вычислительный центр РАН имени А.А. Дородницына), АО «УПКБ «ДЕТАЛЬ»», АО «НИИФИ», АО «ПНИЭИ», АО «НПП «РУБИН»», АО «РАДИОЗАВОД», АО «ППО «ЭЛЕКТРОПРИБОР»», АО «НИИЭМП», АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» имени М.В. Проценко», АО «НИКИРЭТ», ООО «Экспериментальная мастерская «НаукаСофт»», Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева, Пензенский государственный университет.

Издание зарегистрировано в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) с 2005 г.

Редакционная коллегия:

Юрков Н. К. – главный редактор;

Трусов В. А. – ответственный секретарь;

**Гуляков А. Д., Майстер В. А., Северцев Н. А., Сыдыков Е. Б., Абрамов О. В.,
Артамонов Д. В., Безродный Б. Ф., Бецков А. В., Васин С. М., Дивеев А. И., Иофин А. А.,**

**Каиштанов В. А., Кемалов Б. К., Острейковский В. А., Пиганов М. Н.,
Роберт И. В., Романенко Ю. А., Савченко В. П., Садыхов Г. С., Увайсов С. У.,
Халютин С. П., Шайко-Шайковский А. Г., Шахнов В. А., Якимов А. Н.**

ТЕХНОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ АКУСТИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ

Аннотация. Рассматриваются технологии применения пьезоэлектрического эффекта в преобразователях акустических давлений. Показан механизм пьезоэффекта, исследованы особенности конструкций преобразователей, широко применяемых в промышленности. Основное внимание уделено пьезокерамическому материалу и факторам, определяющим чувствительность и точность преобразования. С использованием математического моделирования была определена функция преобразования. Полученное выражение представляет собой математическое описание физических процессов, протекающих в преобразователе акустических давлений на основе пьезоэлектрического модуля.

Ключевые слова: преобразователь акустических давлений, пьезоэффект, пьезоэлектрический материал, математическое моделирование, электрический заряд

Sorokina¹ K.A., Trofimov² A.A., Batyaev³ A.S.

^{1,2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹ sorsorokinakristina01@yandex.ru

² alex.t1978@mail.ru

³ batayev81@gmail.com

TECHNOLOGY OF USING PIEZOELECTRIC EFFECT IN ACOUSTIC PRESSURE TRANSDUCERS

Abstract. This article discusses technologies for applying the piezoelectric effect in acoustic pressure transducers. The mechanism of the piezoelectric effect is considered and the design features of transducers widely used in industry are investigated. The main focus is on the piezoceramic material and the factors determining the sensitivity and accuracy of the conversion. The transformation function was determined using mathematical modeling. The resulting expression is a mathematical description of the physical processes occurring in an acoustic pressure transducer based on a piezoelectric module.

Keywords: Acoustic pressure transducer, piezoelectric effect, piezoelectric material, mathematical modeling, electric charge

Введение

По мере развития производства и растущего усовершенствования продукции ракетно-космической, авиационной техники, автомобильной индустрии и народного хозяйства в целом, возникает необходимость в непрерывном расширении функциональных возможностей преобразователей давления, в том числе акустического. Применение датчиков акустических давлений позволяет бесконтактно регистрировать значения акустического, быстропеременного, импульсного давления [1].

Высокие метрологические характеристики пьезоэлектрических датчиков акустических давлений обеспечиваются уникальными физическими свойствами примененного пьезокерамического элемента (ПКЭ). Электрический заряд возникает на поверхности некоторых кристаллов при их механической деформации (прямой пьезоэффект), или, наоборот, кристалл деформируется под воздействием электрического поля (обратный пьезоэффект) [2]. Основным компонент пьезоэлектрических датчиков — это чувствительный элемент, изготовленный из пьезоэлектрического материала.

В результате действия инерционных сил, которые создаются инерционной массой 2, деформируется пьезоэлемент 1 на основании 3. Когда пьезоэлемент подвергается деформации, его структура изменяется, что и приводит к возникновению электрических зарядов на его обкладках, которые могут быть сняты с помощью электрических выводов 4 на рис.1 [3].

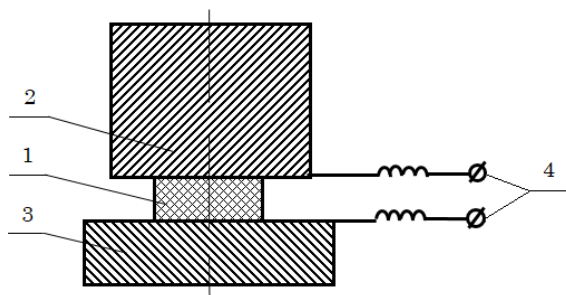


Рисунок 1 - Упрощенная конструктивная схема преобразователя

Наиболее распространенным промышленным пьезоэлектрическим материалом, который используется в производстве пьезоэлементов для датчиков давлений, является пьезоэлектрическая керамика (пьезокерамика) [4].

Пьезокерамика – материал, химическое соединение или твердый раствор (порошок) зёрен (кристаллитов), обладающее пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами, имеющий поликристаллическую структуру (состоит из множества мелких кристаллитов – кристаллических зерен). Представляет собой сложный оксид, обычно включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырёхвалентного титана или циркония.

Различные составы пьезокерамики с определёнными электрофизическими и пьезоэлектрическими свойствами синтезируются путем изменения пропорций исходных материалов и добавок [5]. Наибольшее распространение в производстве датчиков получили пьезокерамические материалы на основе цирконат-титаната свинца (ЦТС).

В последние годы интенсивно идёт разработка новых пьезокерамических материалов. Сейчас известны составы, у которых пьезосвойства сохраняются до 400 °С, к ним относят материалы на основе титаната свинца, метаниобата свинца, метаниобатов натрия и калия [6].

Материалы и методы

По предложенной структурной схеме преобразователя (рис.2) составим его математическую модель и опишем принцип действия (преобразование).

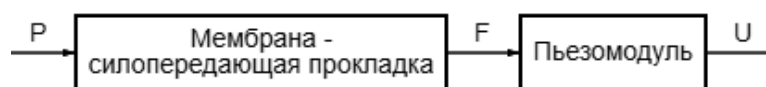


Рисунок 2 - Структурная схема преобразователя акустических давлений

Физический смысл преобразования представляет собой воздействие давления на пьезомодуль. Воздействие происходит через мембрану, на которую непосредственно оказывается давление, которая через силопередающую прокладку деформирует пьезопластину. В результате этого процесса на токосъёмном проводе пьезомодуля возникает электрический потенциал [4]. Принцип действия этого процесса представлен на рисунке 3.

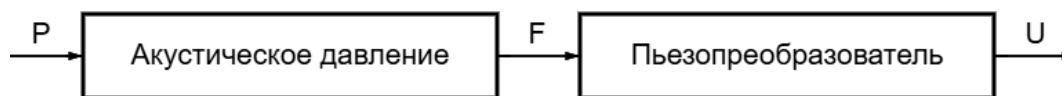


Рисунок 3 - Принцип действия преобразователя акустических давлений

Первый блок «мембрана - силопередающая прокладка» – это система, преобразующая давление P в силу F. Блок пьезомодуля преобразует эту силу в электрические заряды $U = f(F)$ [7]. Исходя из этой структурной схемы, общую функцию преобразования для рассматриваемого преобразователя можно записать следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = S \times P = S_1 \times S_2 \times P, \quad (1)$$

где S_1 , S_2 – коэффициенты преобразования; P – измеряемое давление.

Для расчета приложенного усилия используется понятие эффективной площади. Эффективная площадь $S_{\text{эфф}}$ представляет собой ту часть поверхности мембраны, которая фактически участвует в передаче давления. Она может зависеть от геометрии мембраны, ее материала и условий нагрузки. В общем случае эффективная площадь рассчитывается, как отношение жесткости мембраны по силе к жесткости мембраны по давлению.

В данном случае формула имеет вид:

$$S_{\text{эфф}} = \frac{\pi}{4} \times (R + r)^2 = \pi \times \left(\frac{R+r}{2}\right)^2, \quad (2)$$

где R – радиус мембраны; r – радиус жесткого центра (силопередающей прокладки).

При изменении давления на мембрану происходит ее деформация, что также влияет на эффективную площадь. Важно учитывать, что при высоких давлениях линейность характеристики может нарушаться, и необходимо применять более сложные модели для точного расчета. Такая формула имеет вид:

$$S_{\text{эфф}} = \frac{\pi}{4} \times R^2 \times \frac{(k^2-1)}{k^2} \times \frac{(k^4-1-4k^2 \ln k)}{k^4-2k^2+1-4k^2 \ln k}, \quad (3)$$

при $k = \frac{R}{r}$.

Для описания математической модели по общей функции преобразования для рассматриваемого преобразователя, коэффициент преобразования принимается за эффективную площадь на которое оказывается давление [8].

Когда мембрана воспринимает давление, оно передается на рабочий пьезоэлемент. Сигнал с этого пьезоэлемента считывается с помощью токосъемника и поступает на вход согласующего устройства. Для снижения влияния вибраций к рабочему пьезоэлементу подключен виброкомпенсирующий пьезоэлемент, работающий в противоположном направлении.

Функция этой упругой системы будет иметь вид:

$$F = P \times S_{эфф} \quad (4)$$

Коэффициент преобразования S_1 вычисляется как:

$$S_1 = S_{эфф} = \pi \times \left(\frac{R+r}{2}\right)^2 \quad (5)$$

Эффективная площадь мембраны остаётся неизменной, так как система имеет характеристики, приближенные к линейным характеристикам.

Заряд, возникающий на токосъёмном проводе пьезомодуля в результате деформации, рассчитывается следующим образом:

$$Q = g_{ij} \times P \times S_{эфф} \quad (6)$$

где (g_{ij}) – пьезоэлектрическая постоянная.

Постоянная прямой пьезоэлектричности (g_{ij}) описывает как материал генерирует электрический заряд при приложении механического напряжения [9].

В разрабатываемой конструкции пьезомодуль поляризован в направлении действия давления и испытывает деформации по толщине.

Следует, что:

$$S_2 = g_{ij} = \frac{Q}{F} = \frac{Q}{P \times S_{эфф}} \quad (7)$$

Чувствительность датчика по напряжению определяется по формуле:

$$S_U = \frac{U_{вых}}{P} \quad \text{или} \quad S_U = \frac{S_{эфф} \times g_{ij}}{C + C_n} \quad (8)$$

где $U_{вых}$ – напряжение на выходе датчика, C – емкость датчика, C_n – нагрузочная емкость, P – амплитуда динамического давления.

Чувствительность датчика S определяется следующим образом:

$$S = S_1 \times S_2 = S_{эфф} \times \frac{Q}{P \times S_{эфф}} = \frac{g_{ij} \times P \times S_{эфф}}{P} = g_{ij} \times S_{эфф} = g_{ij} \times \pi \times \left(\frac{R+r}{2}\right)^2 \quad (9)$$

Выходное напряжение рассчитывается, как отношение заряда Q к сумме емкостей пьезопреобразователя C и входной емкости усилителя заряда C_n :

$$U_{вых} = \frac{Q}{C_n + C} \quad (10)$$

В итоге функция преобразования датчика приобретает вид:

$$U_{вых} = \frac{Q}{C_\Sigma} = \frac{g_{ij} \times P \times S_{эфф}}{C_n + C_0} \quad (11)$$

Выражение является математической моделью. Эта модель упрощенно описывает физические процессы, происходящие внутри преобразователя.

Рассмотрим на примере высокочувствительного преобразователя акустических давлений на основе модуля ПМ-7-01 графическое описание функции преобразования, рассчитанной по формуле (11).

Конструкция пьезоэлементов ПМ-7-01 приведена на рисунке 4. Модули ПМ-7-01 изготавливаются из керамики ЦТС-83Г.

Для производства пьезоэлементов из ЦТС-83Г в исходный материал, твердый раствор титаната-цирконата свинца, дополнительно вводят германий и титанат бария в качестве модифицирующих добавок [10].

Модуль ПМ-7-01 обладает следующими основными техническими характеристиками, которые приведены в таблице 1 [11].

Характеристики модуля ПМ-7-01

Таблица 1

Параметр	Значение
Эффективная площадь мембраны, $S_{эфф}$	1,0
Ёмкостная нагрузка, C_n	4700 пФ
Электрическая емкость, C_0	15 пФ
Пьезоэлектрическая постоянная, g_{ij}	310 пКл/Н
Амплитуда динамического давления, P	20000 Па

В программной среде **Matlab** построим графики переходной функции, импульсной переходной функции и логарифмические частотные характеристики преобразователя.

Переходная функция системы описывает ее реакцию на единичный ступенчатый сигнал. На рисунке 5 представлена переходная функция полученной математической модели преобразователя, которая демонстрирует динамику системы во времени.

После подачи входного сигнала амплитуда быстро увеличивается, что свидетельствует о высокой чувствительности датчика к изменению давления. После достижения максимального значения амплитуда стабилизируется и остается практически неизменной, что указывает на то, что датчик достиг устойчивого состояния и готов к

дальнейшим измерениям. Время, за которое амплитуда достигает 95% от максимального значения, называется временем установления. В данном случае это время составляет около 1 секунды, что является достаточно быстрым для многих преобразователей.

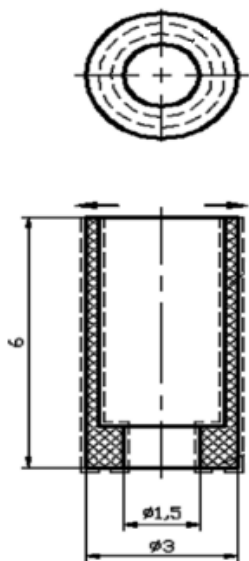


Рисунок 4 -
Пьезокерамический
модуль ПМ-7-01

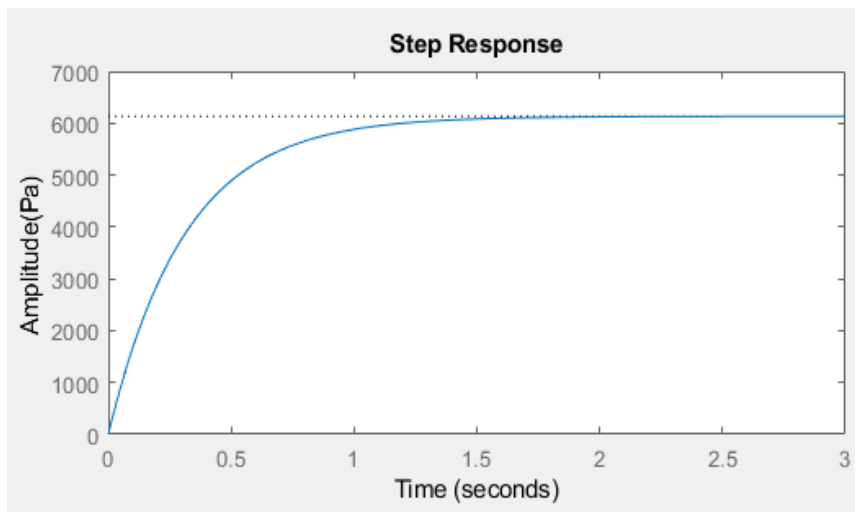


Рисунок 5 - Переходная функция

Импульсная переходная функция показывает реакцию системы на единичный импульсный сигнал. На рисунке 6 представлена импульсная переходная функция, которая позволяет оценить быстродействие системы при воздействии кратковременного сигнала.

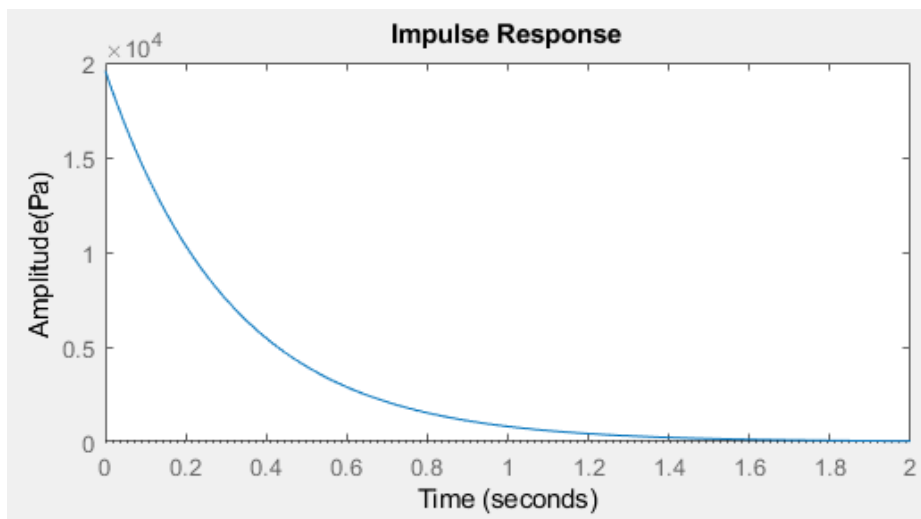


Рисунок 6 - Импульсная переходная функция

Сигнал затухает экспоненциально, что видно по кривой, которая быстро уменьшается с течением времени. Амплитуда сигнала достигает незначительных значений примерно через 0.8 секунд, что можно считать временем затухания. График не показывает значительных колебаний после первоначального импульса, что указывает на хорошую стабильность и точность датчика. График показывает линейное затухание сигнала, что свидетельствует о линейной характеристике датчика в данной области.

Логарифмические частотные характеристики позволяют анализировать поведение системы в частотной области. На рисунке 7 представлена амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики системы, что позволяет оценить устойчивость и динамические свойства системы.

Амплитуда сигнала остается практически постоянной и составляет около 75 дБ. Это указывает на то, что преобразователь акустических давлений имеет хорошую чувствительность в низкочастотном диапазоне. Амплитуда сигнала начинает уменьшаться с увеличением частоты. Это указывает на то, что преобразователь начинает терять свою чувствительность к высокочастотным компонентам сигнала. Скорость спада амплитуды составляет примерно 20 дБ/декаду.

Фаза сигнала остается постоянной в низкочастотном диапазоне. Фаза сигнала начинает уменьшаться с увеличением частоты. Это указывает на фазовый сдвиг между

входным и выходным сигналами. Скорость изменения фазы составляет примерно -90 градусов/декаду.

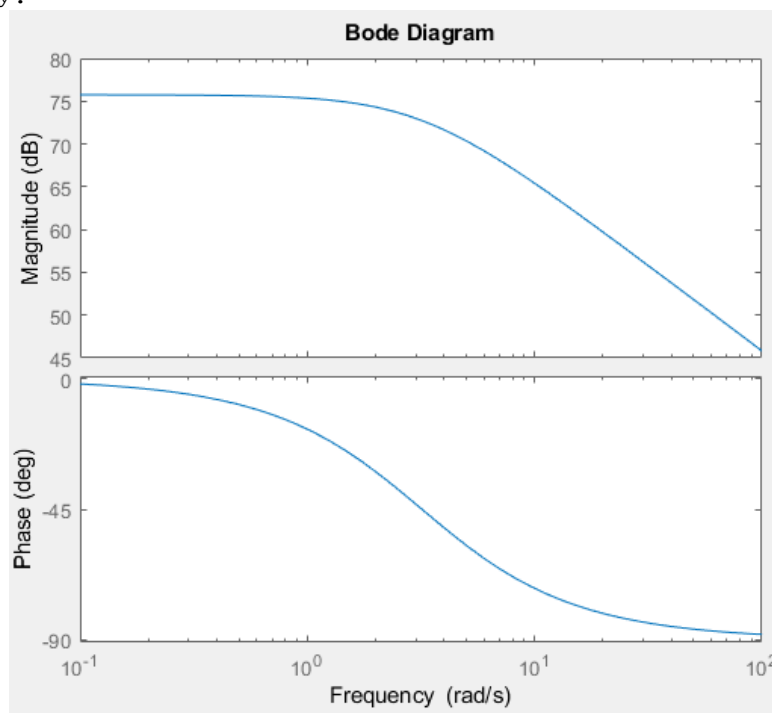


Рисунок 7 - Логарифмические частотные характеристики

Заключение

Был рассмотрен пьезоэлектрический эффект и его применимость для преобразователей акустических давлений. С использованием метода математического моделирования вывели функцию преобразования для преобразователя акустических давлений. В программной среде **Matlab** смоделировали графики переходной функции, импульсной переходной функции и логарифмические частотные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойков Н. А. Измерение давлений при быстропротекающих процессах. – Москва: Энергия, 1970. – 64 с.
2. Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы – 2012): Труды международной научно-технической конференции с элементами научной школы для молодых учёных (г. Пенза, 22-26 октября 2012 г.) / под ред. Е. А. Ломтева, А. Г. Дмитриенко. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 330 с.
3. Мокров Е. А., Крысин Ю. М., Трофимов А. А., Шамраков А. Л. Датчики механических величин: учебное пособие; Пенз. гос. ун-т. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2009. – 151 с.: ил. – Библиогр.: с. 149-151 (35 назв.). – 50 экз.
4. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков // Нано и микросистемная техника. – 2008. – № 3. – С. 34-41.
5. Бастрыгин, К. И. К вопросу исследования и проектирования высокотемпературного датчика динамического давления / К. И. Бастрыгин // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2(10). – С. 85-90.
6. Трофимов А. А., Кикот В. В., Фокина Е. А., Марков Д. М., Смирнов И. Е. Исследование технологии создания высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 2 (42). – С. 90-95.
7. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С., Громова А. А., Ефимов П. Н. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 1 (19). – С. 20-29.
8. Raghavan, V., & Kumaravelan, R. (2021). Acoustic Pressure Measurement Techniques // Measurement Science and Technology, 32.
9. Karpov, A.V., & Ivanov, S.V. (2019). Mathematical Modeling of Piezoelectric Sensors // Sensors and Actuators A: Physical, 285(1), 123-130.
10. Земляков В. Л., Ключников С. Н. Исследование влияния температуры на свойства пьезоматериалов // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 3.
11. Богущ М. В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электро-термоупругих моделей / под ред. А. Е. Панича. – М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
12. Гришко А.К., Кочегаров И.И., Трусов В.А. Проблемы эффективного автоматизированного проектирования управляемых технических систем // Труды международного симпозиума "Надежность и качество", Пенза, 2010. Т. 1. С. 285-287.
13. Трусов В.А., Богатырев А.А., Баннов В.Я., Коршунов Д.В., Васильев А.С. Моделирование РЭС. Вибрационные воздействия на систему с одной степенью свободы // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 268-270.
14. Реута, Н. С. Технология и области применения программируемых логических интегральных схем / Н. С. Реута, Н. В. Горячев, В. А. Трусов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2015. – № 2 (82). – С. 190-192. – URL: <https://moluch.ru/archive/82/14934/> (дата обращения: 07.04.2022).
15. Юрков Н.К., Кочегаров И.И., Трусов В.А. Разработка единой надежно-ориентированной модели радиоэлектронных средств // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество», 2020, Т. 1. С. 19-21.