

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЬЕЗОАКТЮАТОРОВ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А. А. Трофимов¹, В. В. Кикот², С. А. Здобнов³, С. О. Забродин⁴, Т. О. Жуков⁵

^{1,2,3,4,5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹alex.t1978@mail.ru, ²kikot.v.v@mail.ru, ³sa_zdobnov@mail.ru, ⁴iit@pnzgu.ru, ⁵iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы определяется распространенностью задач контроля и управления изделий гражданской техники с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций. Целью работы является разработка и освоение в серийном производстве унифицированных рядов многослойных пьезопленочных керамических элементов на основе пьезоэлектрического эффекта с использованием технологии шликерного литья для системы управления двигателями внутреннего сгорания. *Материалы и методы.* В работе использованы технологии шликерного литья и холодного полусухого прессования. *Результаты.* Приводятся результаты исследований технологии создания многослойных пьезоактюаторов инжекторов двигателей внутреннего сгорания, изготовленных с использованием технологии шликерного литья. Представлены технические характеристики лабораторных образцов многослойных пьезоактюаторов, изготовленных с использованием технологии полусухого холодного прессования. Полученное значение относительного рабочего хода при управляющем электрическом напряжении 200 В составило от 0,05 до 0,08 %, при минус 200 В составило от минус 0,06 до минус 0,033 %. Дальнейшее улучшение технических характеристик пьезоактюаторов, изготовленных с использованием технологии полусухого холодного прессования, в том числе увеличение относительного рабочего хода до 0,13 % при управляющем электрическом напряжении 140 В, возможно путем снижения толщины заготовок-пьезопластин с 0,2 до 0,1 мм и изменения способа их металлизации и сборки (склеивания).

Ключевые слова: инжектор, многослойный пьезоактюатор, макет, цирконат-титаната свинца, пьезокерамический материал, шликерное литье, полусухое прессование, рабочий ход

Для цитирования: Трофимов А. А., Кикот В. В., Здобнов С. А., Забродин С. О., Жуков Т. О. Технология изготовления многослойных пьезоактюаторов для системы управления двигателями внутреннего сгорания // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 1. С. 32–39. doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-4

MANUFACTURING TECHNOLOGY OF MULTILAYER PIEZO ACTUATORS FOR CONTROL SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A.A. Trofimov¹, V.V. Kikot², S.A. Zdobnov³, S.O. Zabrodin⁴, T.O. Zhukov⁵

^{1,2,3,4,5} Penza State University, Penza, Russia

¹alex.t1978@mail.ru, ²kikot.v.v@mail.ru, ³sa_zdobnov@mail.ru, ⁴iit@pnzgu.ru, ⁵iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic is determined by the prevalence of monitoring and control tasks for civil engineering products in order to prevent the occurrence of emergency situations. The goal of the work is to develop and master in mass production of unified rows of multilayer piezo-film ceramic elements based on the piezoelectric effect using slip casting technology for the control system of internal combustion engines. *Materials and methods.* The work uses slip casting and cold semi-dry pressing technologies. *Results.* The results of research into the technology for creating multilayer piezo actuators for injectors of internal combustion engines, manufactured using slip casting technology, are presented. The technical characteristics of laboratory samples of multilayer piezo actuators manufactured using semi-dry cold pressing technology are presented. The obtained value of the relative working stroke at a control electrical voltage of 200 V ranged from 0.05 to 0.08 %, and at minus 200 V it ranged from minus 0.06 to minus 0.033 %. Further improvement of the technical characteristics of piezo actuators manufactured using semi-dry cold pressing technology, including an increase in the relative working stroke to 0.13 % at a control electrical voltage of 140 V, is possible by reducing the thickness of the piezo plate blanks from 0.2 to 0.1 mm and changes in the method of their metallization and assembly (gluing).

Keywords: injector, multilayer piezoactuator, model, lead zirconate-titanate, piezoceramic material, slip casting, semi-dry pressing, working stroke

For citation: Trofimov A.A., Kikot V.V., Zdobnov S.A., Zabrodin S.O., Zhukov T.O. Manufacturing technology of multilayer piezo actuators for control systems of internal combustion engines. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(1):32–39. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-1-4

Введение

Пьезокерамика находит широкое применение в различных областях народного хозяйства и специальной техники [1–3]. Пьезокерамические элементы могут быть использованы в различных акустических устройствах, в датчиках для измерения давлений, вибраций и ускорения, датчиках для ультразвуковых линий задержки, в фильтровой технике, системах зажигания, гироскопах, пьезотрансформаторах и т.д.

Разнообразие областей применения пьезокерамики приводит к большому разнообразию требований на ее свойства. Например: для специальных пьезодатчиков требуется керамика, способная работать в широком интервале температур, для фильтровых резонаторов необходима высокая стабильность параметров в широком интервале температур и в течение длительного промежутка времени, для гидроакустических применений необходима пьезокерамика, способная работать в сильных электрических полях и при больших давлениях, для гидроакустики и сейсмоприемников требуется высокоэффективная пьезокерамика (с большими значениями пьезомодулей). Требования, предъявляемые к пьезокерамике, непрерывно повышаются. Это заставляет искать новые пьезокерамические материалы и исследовать их свойства.

К изыскиваемым в этой работе пьезоэлектрическим материалам для работы их в качестве преобразователя в специальных пьезодатчиках предъявляются следующие требования: работоспособность в диапазоне температур от минус 60 °С до +600 °С; высокая чувствительность; минимальное изменение чувствительности от времени, температуры, давления; минимальный температурный гистерезис чувствительности; высокая прочность пьезокерамики.

К настоящему времени практическое применение нашли в основном две группы пьезокерамических материалов. К ним относятся: титанат бария и его производные материалы на основе титаната свинца и ниобатные материалы. Эти материалы наиболее полно исследованы и именно для них в литературе известны характеристики, определяющие возможность использования их в качестве пьезоэлектрических преобразователей. Так, известно, что применение в пьезодатчиках керамики титаната бария ограничено температурами порядка 70–80 °С.

Введение добавок Са и Рb повышает рабочие температуры до 110–130 °С, но вдвое снижает чувствительность. Введение кобальта в твердый раствор титаната бария-кальция (BaCa)TiO₃ повышает устойчивость состава к воздействию сильных электрических полей и больших механических напряжений. Низкий верхний предел рабочих температур и низкотемпературные фазовые переходы ограничивают применение керамик на основе титаната бария в широком температурном интервале.

С целью расширения интервала рабочих температур были разработаны пьезодатчики с керамикой (PbBa)Nb₂O₆. Эти пьезодатчики работают на сдвиг, чувствительность их характеризуется пьезомодулем d_{15} , верхний предел рабочих температур – до 200 °С.

Пьезокерамика на основе твердых растворов (PbBa)Nb₂O₆ по ряду показателей эффективнее составов системы титаната бария, однако пока не удается определить условия для получения стабильных составов.

Сейчас в пьезоэлектрических датчиках применяются пьезокерамические материалы системы ЦТС (цирконат-титанат свинца). Семейство пьезокерамик ЦТС имеет температуры Кюри до 350–400 °С, рабочие температуры порядка 250 °С, хорошую пьезочувствительность, но требуют тщательных исследований с учетом предъявляемых требований.

В последние годы интенсивно ведется разработка новых пьезокерамических материалов. Сейчас известны составы, у которых достаточно хорошие пьезосвойства сохраняются до 400 °С. Это материалы на основе титаната свинца, метаниобата свинца, метаниобатов натрия и калия.

В настоящее время известна система управления питанием двигателя внутреннего сгорания с прямым впрыском топлива на основе инжекторов с соленоидными игольчатыми клапанами: при деактивированном соленоиде подпружиненная игла закрывает клапан (сопло инжектора), при активации соленоида игла поднимается и топливо впрыскивается в камеру сгорания.

Разрабатываемая система свободна от недостатков, имеющих у системы инжекторов с соленоидными игольчатыми клапанами. У инжекторов с пьезоактюаторами на основе многослойных пьезокерамических элементов управляющее электрическое напряжение ниже, чем у монолитных (при тех же габаритных размерах и рабочем ходе). Например, чтобы обеспечить рабочий ход 1 мкм, монолитному пьезоактюатору толщиной 1 мм требуется около 1 кВ, многослойному той же толщины и состоящему из слоев толщиной от 0,04 до 0,1 мм, – около 100 В [4].

Материалом, используемым для изготовления пьезоактюаторов, является твердый раствор ЦТС, состав которого изменяется при его изготовлении введением различных легирующих добавок, которые определяют требуемые пьезочувствительность (до 550 пКл/Н), добротность (до 2000), диапазон рабочих температур (из диапазона от минус 253 до 250 °С) и рабочий ход или относительное изменение геометрических размеров до не менее $1 \cdot 10^{-3}$). При изготовлении пьезоактюаторов используются две технологии: на основе шликерного литья и металлизации пьезопленок толщиной от 0,02 мм и более и последующей сборки и спекания из пьезопленок заготовок пьезоактюаторов; на основе полусухого холодного прессования, последующего спекания, механообработки и склеивания заготовок-пьезопластин толщиной от 0,1 мм [4].

Применение игольчатых клапанов с пьезоактюаторами привело к улучшению технических характеристик системы управления питанием двигателем путем увеличения блокирующего усилия, управляющего клапаном, и повышения быстродействия и точности задания перемещения иглы клапана форсунки, что понизило расход топлива на 15 % и более [5]. Например, пьезоактюаторы инжекторов обеспечивают управление клапанами с быстродействием от 1 до 10 мс при максимальном рабочем ходе от 3 до 5 мкм и усилием до 5 кН [6]. Основными задачами, решаемыми в рамках данной работы являются:

- поиск и исследование новых пьезокерамических материалов, работоспособных в интервале рабочих температур от минус 60 °С до +600 °С;
- исследование возможности повышения температурной стабильности пьезокерамики;
- поиск путей увеличения пьезочувствительности пьезоматериалов;
- разработка теоретических основ влияния дефектов структуры на стабильность рабочих параметров пьезоматериалов;
- получение и исследование диэлектрических свойств и стабильности рабочих параметров при воздействии дестабилизирующих факторов, в том числе при воздействии повышенных температур;
- внедрение разработанной технологии изготовления высокотемпературных текстурированных материалов пьезоэлементов при изготовлении пьезопроводов на основе пьезоэлектрических пластин, полученных методом холодного полусухого прессования для системы управления двигателями внутреннего сгорания.

Пьезоэлементы применяются в гидроакустических излучателях и приемниках, в ультразвуковых линиях задержки, в качестве резонаторов пьезокерамических фильтров и преобразователей электромеханических и камертонных фильтров, а также в датчиках для измерения ускорений, вибрации, давлений. Находят применение в телефонах, микрофонах, звукоснимателях, в ультразвуковых устройствах, предназначенных для интенсификации технологических процессов, сейсмоприемниках, аппаратах медицинской диагностики, гироскопах и многих других устройствах.

Пьезокерамические элементы в составе многослойной структуры достаточно широко используются для создания чувствительных элементов датчиков высокой чувствительности, микроконденсаторов переменной емкости, микрофазовращателей, Переключателей, пьезопроводов, управляемых микрзеркалами для адаптивной оптики и других устройствах микро и нано электроники.

Производство многослойных пьезокерамических элементов, состоящих из чередующихся слоев, обеспечивает ряд преимуществ:

- очень тонкие керамические слои позволяют создавать большие перемещения при низких напряжениях возбуждения (20–100 В);
- высокая интенсивность электрического поля (до 3000 В/мм) позволяет получить большую величину перемещения на единицу объема;
- малая мощность потребления;
- надежная работа в жестких условиях благодаря использованию встроенных электродов.

Пьезокерамический материал с температурой точки Кюри > 350 °С позволяет расширить область применения пьезоэлементов на его основе.

Создание сегнето-пьезоэлектрических материалов с оптимальными свойствами для различных применений является важной материаловедческой задачей. Параметры пьезоэлементов в значительной степени определяются составом пьезокерамического материала, из которого они изготавливаются.

Основная часть

Для исследования возможностей применения технологии шликерного литья при изготовлении пьезоактюаторов фирмой «Технодизель Мурсия» (Испания), используемых в составе пьезоактюаторного инжектора (рис. 1), предоставлены образцы многослойных пьезоактюаторов.



Рис. 1. Конструкция пьезоактюаторного инжектора

При анализе пьезоактюаторов установлено, что в их конструкции имеются многослойные пьезоэлементы, соединенные эластичным электроизоляционным клеем, в том числе: по одному верхнему и нижнему пьезоэлементу толщиной 4,85 мм (каждый из 36 пьезопленок: 14 – 0,072 мм, 6 – 0,0125 мм, а также из 16 – 0,0197 мм толщиной, которые не подключены к управляющим электродам) и по 16 рабочих пьезоэлементов толщиной 1,15 мм (каждый из 17 пьезопленок толщиной 0,068 мм), причем пьезопленки имеют двухстороннюю металлизацию. Пьезопленки изготовлены с использованием шликерного литья из сегнетомягкого пьезокерамического материала плотностью не менее $7,3 \text{ г/см}^3$, температурой спекания не более $950 \text{ }^\circ\text{C}$, относительной диэлектрической проницаемостью 1500 и пьезочувствительностью d_{31} не менее 160 пКл/Н, d_{33} не менее 320 пКл/Н [7].

Представленные образцы пьезоактюаторов обеспечивают рабочий ход не менее 0,04 мм при управляющем электрическом напряжении 140 В и температуре эксплуатации от минус 40 до $120 \text{ }^\circ\text{C}$.

В связи с тем, что технология шликерного литья находится на этапе отработки, при изготовлении макетов применена имеющаяся технология полусухого прессования для определения возможности ее использования в производстве пьезоактюаторов. Из материала НФИ-50 (пьезочувствительность d_{33} не менее 400 пКл/Н; относительная диэлектрическая проницаемость не менее 1500) изготовлены заготовки-пьезопластины, приведенные на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид пьезопленочного керамического элемента

1. Покрытие поверхностей А и Б Вж.Ср.0,005min допускается Ср.0,005min Хим.Н.0,005min.
 2. На металлизированных и неметаллизированных поверхностях пьезоэлемента не допускаются трещины вздутия и отслаивания покрытия.
 3. Маркировать поверхность А положительной полярности знаком «•». Способ нанесения знака не регламентируется.
 4. Пьезочувствительность d_{33} должна быть не менее 250 пКл/Н.
- Внешний вид одного из изготовленных лабораторных образцов многослойного пьезоактюатора приведен на рис. 3.

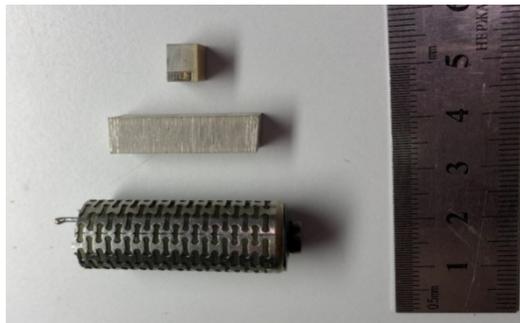


Рис. 3. Лабораторный образец пьезоактюатора

Рабочий ход пьезоактюатора зависит в основном от пьезочувствительности материала d_{33} и напряженности приложенного к пьезоактюатору управляющего электрического поля. В процессе эксплуатации пьезоактюатора при воздействующей противодействующей силе необходимо учитывать характер ее воздействия: постоянная или переменная. На рис. 4 показано влияние противодействующих сил на рабочий ход пьезоактюатора. Рабочий ход при отсутствии противодействующей силы (нагружения) принят равным S_0 [5].

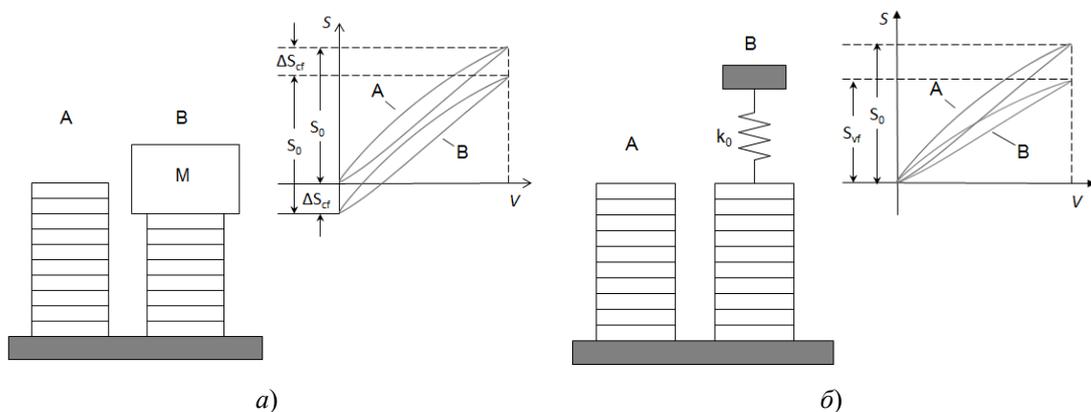


Рис. 4. Влияние противодействующей силы на рабочий ход пьезоактюатора: *а* – постоянной; *б* – переменной

Если нагружение остается постоянным во время процесса приведения пьезоактюатора в действие (при воздействии постоянной массы или предварительного нагружения пружиной), то пьезоактюатор будет первоначально сжат на ΔS_{cf} , причем, несмотря на предварительное нагружение, рабочий ход пьезоактюатора будет прежним, и полный рабочий ход обеспечивается максимальным управляющим электрическим напряжением. Величину сжатия ΔS_{cf} можно определить по выражению

$$\Delta S_{cf} = \frac{M}{k}, \quad (1)$$

где ΔS_{cf} – это сжатие пьезоактюатора с жесткостью k из-за постоянной нагрузки M , приложенной к пьезоактюатору.

Если нагрузка пьезоактюатора изменяется в процессе эксплуатации, например, при воздействии на жесткую пружину, то его рабочий ход в этом случае будет меньше, чем рабочий ход в ненагруженном состоянии S_0 . Если пьезоактюатор будет противодействовать пружине с постоянной k_0 , то его фактический рабочий ход S_{vf} вычисляется по выражению [5]

$$S_{vf} = \frac{k_0 S_0}{k + k_0}. \quad (2)$$

Рабочий ход исследуемых ненагруженных пьезоактюаторов измерен при натурном эксперименте, результаты которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений рабочего хода пьезоактюаторов

| Наименование | Толщина, мм | Удлинение | | Сжатие | |
|---|-------------|---|--|---|--|
| | | Управляющее электрическое напряжение, В | Рабочий ход, мм (относительный рабочий ход, %) | Управляющее электрическое напряжение, В | Рабочий ход, мм (относительный рабочий ход, %) |
| 1. Пьезоактюатор, изготовленный с использованием технологии шликерного литья | 30 | 140 | 0,04 (0,13) | – | – |
| 2. Макет пьезоактюатора, изготовленный с использованием технологии полусухого прессования | 30 | 200 | 0,015 (0,05) | –200 | –0,01 (–0,033) |
| 3. Макет пьезоактюатора, изготовленный с использованием технологии полусухого прессования | 10 | 200 | 0,008 (0,08) | –200 | –0,006 (–0,06) |

Заключение

Рассмотрены известные сейчас сегнетоэлектрики и твердые растворы на их основе, перспективные для получения пьезокерамики. Проведен обзор кристаллохимических принципов поиска новых составов, работоспособных в диапазоне температур от минус 60 °С до +600 °С, проанализированы экспериментальные данные относительно возможности управления электрофизическими свойствами материала, рассмотрены вопросы, связанные с повышением пьезоактивности.

Рассмотрены вопросы технологии производства пьезокерамики, влияние отдельных технологических факторов на ее электрофизические и механические свойства. Исследованы режимы термообработки и поляризации, проведен рентгеноструктурный анализ.

В процессе выполнения работы на основе теоретического анализа получены зависимости, показывающие влияние примесных атомов на стабильность пьезоэлектрических свойств пьезокерамики. Проведен анализ основных механизмов, связанных с диффузией примесей к доменным границам, определены характерные времена таких процессов, предложены рекомендации по улучшению стабильности рабочих параметров пьезоматериалов. Проведены исследования структуры, диэлектрических и пьезоэлектрических свойств этой керамики в интервале температур 293–900 К, стабильности пьезосвойств при циклическом изменении температуры от 293 до 570 К. Изготовлены экспериментальные образцы пьезоэлементов из керамики.

Рассмотрена технология изготовления многослойных пьезоактюаторов толщиной до 30 мм и относительным рабочим ходом при управляющем электрическом напряжении 200 В от 0,05 до 0,08 %, при минус 200 В от минус 0,06 до минус 0,033 %.

Дальнейшее улучшение технических характеристик пьезоактюаторов, изготовленных с использованием технологии полусухого холодного прессования, в том числе увеличение

относительного рабочего хода до не менее 0,13 % при управляющем электрическом напряжении 140 В, возможно путем снижения толщины заготовок-пьезопластин с 0,2 до 0,1 мм и изменения способа их металлизации и сборки (склеивания).

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Вопросы разработки унифицированных конструкций датчиков для перспективных систем измерения и контроля специальной техники // Измерительная техника. 2010. № 10. С. 18–21.
2. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
3. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
4. Окадзаки К. Технология керамических диэлектриков : монография / пер. с япон. М. М. Богачихина, Л. Р. Зайонца. М. : Энергия, 1976. 327 с.
5. Davoudi S. Effect of temperature and thermal cycles on PZT ceramic performance in fuel injector applications // Library University of Toronto. URL: https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/33393/1/Davoudi_Sadegh_201211_MASc_thesis.pdf (дата обращения: 02.10.2021).
6. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб. : СПб ГУ ИТМО, 2011. 131 с.
7. Губич И. А., Кикот В. В., Кошкин Г. А. [и др.]. Исследование многослойных пьезоактюаторов инжекторов системы управления питанием двигателей внутреннего сгорания // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : XXXIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2021. С. 98–103.

References

1. Dmitrienko A.G., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Issues of development of unified sensor designs for advanced measurement and control systems of special equipment. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment*. 2010;(10):18–21. (In Russ.)
2. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and, based on them, measurement, monitoring and control systems for technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
3. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1): 20–28. (In Russ.)
4. Okadzaki K. *Tekhnologiya keramicheskikh dielektrikov: monografiya = Technology of ceramic dielectrics : monograph* / Translated from Japanese. M.M. Bogachikhin, L.R. Zayonts. Moscow: Energiya, 1976:327. (In Russ.)
5. Davoudi S. Effect of temperature and thermal cycles on PZT ceramic performance in fuel injector applications. *Library University of Toronto*. Available at: https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/33393/1/Davoudi_Sadegh_201211_MASc_thesis.pdf (accessed 02.10.2021).
6. Bobtsov A.A., Boykov V.I., Bystrov S.V., Grigor'ev V.V. *Ispolnitel'nye ustroystva i sistemy dlya mikroperemeshcheniy = Executive devices and systems for micro-displacement*. Saint Petersburg: SPb GU ITMO, 2011:131. (In Russ.)
7. Gubich I.A., Kikot V.V., Koshkin G.A. et al. Investigation of multilayer piezoactuators of injectors of the internal combustion engine power management system. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: XXXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. conf. = Problems of automation and control in technical systems : XXXIV International scientific and technical conf.* Penza, 2021:98–103. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Alexei A. Trofimov

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

Виктор Викторович Кикот

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kikot.v.v@mail.ru

Victor V. Kikot

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of rocket-space and aviation instrumentation,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Сергей Александрович Здобнов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sa_zdobnov@mail.ru

Sergey A. Zbodnov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Станислав Олегович Забродин

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

Stanislav O. Zabrodin

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

Тимофей Олегович Жуков

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Timofei O. Zhukov

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 25.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2024

Принята к публикации/Accepted 16.02.2024