

УДК 67.02.681
doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-6

ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЕНСОРНЫХ И АКТЮАТОРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ СТРУКТУРНОГО МОНИТОРИНГА РАБОТОСПОСОБНОСТИ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А. А. Трофимов¹, С. А. Здобнов², С. О. Забродин³, Е. А. Фокина⁴

^{1,2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ alex.t1978@mail.ru, ² sa_zdobnov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ ekaterina.isay1997@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* На сегодняшний день в России отсутствуют научно-технический и экспериментально-технологический заделы по разработке систем структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов ракетно-космической техники и наземной космической инфраструктуры с преобразователями физических величин на основе макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта, необходимые для полной оценки надежности технически сложных объектов неразрушающими методами. Разработка аэрокосмических структур последнего поколения требует создания новейших материалов, которые имели бы высокие физические и механические параметры, отвечали бы требованиям по надежности и ресурсу прочности для решения специфических задач. Большое значение отводится также активным материалам и структурам, способным формировать функциональные формы и профили в зависимости от внешнего воздействия, т.е. обеспечивать выполнение одного из принципов концепции управления перемещением – адаптроники. Формирование функциональных форм и профилей позволит обеспечивать оптимальный аэродинамический профиль крыла, лучшую маневренность летательного аппарата, снизить потребление топлива, энергии и обеспечить лучший дистанционный контроль в экстремальных условиях космоса. Целью данной статьи является создание научно-технического и экспериментально-технологического задела по разработке перспективных технологий изготовления сенсорных и актюаторных элементов систем структурного мониторинга работоспособности на основе пьезокерамических материалов и технологий встраивания в элементы композитных конструкций изделий РКТ и НКИ с целью контроля и управления их характеристиками для предупреждения возникновения аварийных ситуаций. *Материалы и методы.* Рассмотрена структура системы структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов РКТ и НКИ с преобразователями физических величин на основе макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта. *Результаты.* В результате реализации технологии будут созданы импортонезависимые саморегулируемые адаптивные структуры конструкций и оборудования космических аппаратов на основе управляемых свойств материалов с реакцией на внешние воздействия. Внедрение технологии позволит создать эффективную систему управления колебаниями элементов конструкции. Разработанные пьезоактюаторы найдут применения в системах структурного мониторинга авиакосмической промышленности в ракетно-космических технологиях и машиностроении.

Ключевые слова: математическая модель, структурный мониторинг, пьезокерамика, пьезоактюатор, пьезоэффект, макроволоконные актюаторы, макроволоконные пьезокомпозиты

Для цитирования: Трофимов А. А., Здобнов С. А., Забродин С. О., Фокина Е. А. Вопросы разработки технологии изготовления сенсорных и актюаторных элементов систем структурного мониторинга работоспособности на основе пьезокерамических материалов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 2. С. 51–60. doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-6

QUESTIONS OF DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY AND MANUFACTURING OF SENSOR AND ACTUATOR ELEMENTS OF THE SYSTEMS OF STRUCTURAL PERFORMANCE MONITORING BASED ON PIEZOCERAMIC MATERIALS

A.A. Trofimov¹, S.A. Zdobnov², S.O. Zabrodin³, E.A. Fokina⁴

^{1,2,3,4} Penza State University, Penza, Russia
¹ alex.t1978@mail.ru, ² sa_zdobnov@mail.ru, ³ iit@pnzgu.ru, ⁴ ekaterina.isay1997@gmail.com

Abstract. *Background.* As of today in Russia there are no scientific-technical and experimental-technological reserves on development of systems of structural monitoring of serviceability of products and objects of rocket-space technology

(RST) and ground space infrastructure (GSI) with transducers of physical quantities on the basis of macrofiber actuators on the basis of inverse piezo effect necessary for full assessment of reliability of technically complex objects by non-destructive methods. The development of the latest generation of aerospace structures requires the creation of advanced materials that would have high physical and mechanical parameters, meet reliability and durability requirements for specific tasks. Great importance is also given to active materials and structures capable of forming functional shapes and profiles depending on the external influence, i.e. to ensure the fulfillment of one of the principles of the motion control concept – adaptronics. The formation of functional shapes and profiles will provide optimal wing aerodynamic profile, better maneuverability of the aircraft, reduce fuel, energy consumption and provide better remote control in extreme space conditions. The purpose of this article is to create a scientific-technical and experimental-technological reserve for the development of advanced technologies for the production of sensor and actuator elements of structural performance monitoring systems based on piezoceramic materials and technologies for incorporation into the elements of composite structures of RST and GSI products in order to control and manage their characteristics to prevent emergencies. *Materials and methods.* The paper considers the structure of the system of structural monitoring of serviceability of products and objects of RST and GSI with transducers of physical quantities on the basis of macrofiber actuators based on the inverse piezo effect. *Results.* As a result of technology implementation, import-independent self-regulating adaptive structures of spacecraft structures and equipment will be created on the basis of controllable properties of materials with response to external influences. Implementation of the technology will make it possible to create an effective system for controlling vibrations of structural elements. The developed piezoactuators will find applications in structural monitoring systems of the aerospace industry in rocket and space technologies and mechanical engineering.

Keywords: mathematical model, structural monitoring, piezoceramics, piezoactuator, piezo effect, macrofiber actuators, macrofiber piezocomposites

For citation: Trofimov A.A., Zdobnov S.A., Zabrodin S.O., Fokina E.A. Questions of development of the technology and manufacturing of sensor and actuator elements of the systems of structural performance monitoring based on piezoceramic materials. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(2):51–60. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-2-6

Основная часть

Основой концепции работы является развитие структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов ракетно-космической промышленности, основанной на использовании современных информационно-измерительных систем, имеющих в своем составе сенсоры на основе наноразмерных пьезоэлектрических пленок и пьезоактюаторы [1, 2].

Актуальность работы определяется распространенностью задач структурного мониторинга характеристик конструктивных элементов изделий ракетно-космической техники (РКТ) и объектов наземной космической инфраструктуры (НКИ) с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций [3]. Контроль и управление техническим состоянием конструктивных элементов изделий в течение всего периода возможного проявления деформационного воздействия должен носить систематический характер и позволять осуществлять оценку происходящих изменений и структурных нарушений на основе количественных критериев, а также позволять управлять и компенсировать процессы потенциально опасных вибраций, шумов и механических напряжений.

Разработка аэрокосмических структур последнего поколения требует создания новейших материалов, которые имели бы высокие физические и механические параметры, отвечали бы требованиям по надежности и ресурсу прочности для решения специфических задач. Большое значение отводится также активным материалам и структурам, способным формировать функциональные формы и профили в зависимости от внешнего воздействия, т.е. обеспечивать выполнение одного из принципов концепции управления перемещением – адаптроники. Формирование функциональных форм и профилей позволит обеспечивать оптимальный аэродинамический профиль крыла, лучшую маневренность летательного аппарата, снизить потребление топлива, энергии и обеспечить лучший дистанционный контроль в экстремальных условиях космоса.

Большинство современных методов неразрушающего мониторинга и контроля изделий и объектов РКТ и НКИ осуществляется либо в ходе производства узлов и структур, либо в ходе их эксплуатации, но при этом работа изделия должна быть приостановлена, что не всегда возможно и требует дополнительных временных и экономических затрат.

Ряд аварий и катастроф с ракетно-космической техникой, произошедших в США в конце 90-х гг. прошлого века, заставили специалистов этой области коренным образом пересмотреть вопросы мониторинга работоспособности технически сложных объектов. Первыми поставили эту проблему военные, которые в 2001 г. подчеркнули важность осуществления мониторинга

работоспособности в режиме реального времени ракетно-космической техники в целях обеспечения ее высокого уровня надежности, безопасности во время хранения, на боевом дежурстве и в ходе полетов (пусков), а также снижения времени простоя вследствие ее технического обслуживания. В этом же году совместно с НАСА было проведено обсуждение необходимости применения такого мониторинга для перспективных летательных аппаратов умеренной стоимости, способных многократно выходить в космос.

Особую актуальность этой работе придала трагедия 2003 г. с космическим многоразовым кораблем «Колумбия», после чего НАСА окончательно определилась с новой концепцией, получившей название «Структурный мониторинг работоспособности» (СМР) – (*Structural Health Monitoring – SHM*). Эта новая концепция оценки надежности технически сложных объектов неразрушающими методами основана на использовании структурного отклика объекта в ходе его функционирования (эксплуатации) с целью определения уровня его работоспособности и оценки оставшегося ресурса с помощью аппаратуры, интегрированной или имплантированной в объект. СМР является ключевым компонентом перспективных систем прогнозирования дефектов и определения оставшегося уровня работоспособности объектов.

Основными компонентами СМР являются:

- актюаторы для возбуждения колебаний в конструкции;
- сенсоры для приема сигнала или отклика;
- алгоритм обработки сигнала с целью выявления дефекта или его признака, измерения его параметров;
- компьютер или микроконтроллер для управления процессом мониторинга и обеспечения его алгоритма работы;
- телеметрия – компонент передачи данных о состоянии узла, конструкции или всего объекта;
- источник электроэнергии (батарея, бортовая сеть или система утилизации энергии).

Задачи по структурному мониторингу характеристик конструктивных элементов изделий и объектов РКТ и НКИ, авиационной и гражданской техники с целью предупреждения возникновения аварийных ситуаций, а также формированию функциональных форм для обеспечения оптимального аэродинамического профиля конструктивных элементов изделий авиационной техники возможно решить, используя макроволоконные актюаторы на основе обратного пьезоэффекта, способные реагировать на изменение внешних или внутренних условий (изменяя свое статическое и динамическое поведение), а также быть использованными в качестве сенсоров. Макроволоконные актюаторы на основе обратного пьезоэффекта способны получать информацию и реагировать на изменение внешних или внутренних условий [4, 5]. В общем виде их можно представить как материалы и структуры с четырьмя встроенными функциями: процессорной, сенсорной, исполнительной и восстановительной. С применением макроволоконных актюаторов, обладающих вышеперечисленными функциями, возможно реализовывать следующее [6]:

- преобразование измеряемой величины в пропорциональный электрический сигнал;
- одновременное измерение нескольких физических величин;
- компенсация частотной и температурной погрешностей метрологических характеристик, вызванных неизмеряемыми воздействиями и влияющими факторами;
- подавление нежелательных резонансных колебаний, вибраций, шумов управляемым демпфированием;
- адаптация к условиям эксплуатации;
- осуществление задач адаптроники и др.

В настоящее время в России отсутствуют научно-технический и экспериментально-технологический заделы по разработке систем структурного мониторинга работоспособности изделий и объектов РКТ и НКИ с преобразователями физических величин на основе макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта.

Преимуществом разрабатываемой СМР по сравнению с инновационными разработками аналогичного назначения за рубежом является использование комплексного подхода при разработке физико-математических и топологических моделей, программ расчета по локализации макроволоконных актюаторов на основе обратного пьезоэффекта с точки зрения удовлетворения конструктивно-механических требований по надежности конструктивных элементов изделий и объектов РКТ и НКИ, а также структурно-алгоритмических моделей конструктивных элементов изделий и объектов РКТ и НКИ для обеспечения инкорпорирования макроволоконными актюаторами.

Проблемные области в России и за рубежом указаны на рис. 1.



Рис. 1. Проблемные области в России и за рубежом

Целью данной статьи является создание научно-технического и экспериментально-технологического задела по разработке перспективных технологий изготовления сенсорных и актюаторных элементов систем структурного мониторинга работоспособности на основе пьезо-керамических материалов и технологий встраивания в элементы композитных конструкций изделий РКТ и НКИ с целью контроля и управления их характеристиками для предупреждения возникновения аварийных ситуаций. Повышение надежности, безопасности и улучшение аварийной защиты при стендовой отработке и эксплуатации изделий РКТ и объектов НКИ на основе принятия упреждающего решения на интервал прогноза по результатам оперативного поиска места, локализации, анализа, оценки и прогнозирования степени и динамики развития дефектов на интервале принятия решения.

Для реализации поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- исследование требований, предъявляемых со стороны систем СМР изделий РКТ и НКИ к актюаторам на основе пьезоэлектрического эффекта;
- разработка методики выбора пьезоматериала по критериям обеспечения максимальной точности, чувствительности и надежности при комплексном воздействии внешних факторов;
- разработка методик обеспечения заданных режимов хода и генерирования силы с исключением возможности деполяризации пьезоматериалов;
- исследование и разработка технологии, обеспечивающей уменьшение гистерезиса, последствий и ползучести пьезоэлементов;
- исследование и разработка конструктивных и технологических решений по созданию осевых, сдвиговых, изгибных пьезоактюаторов для имплантации в исследуемые конструктивные элементы;
- исследование и разработка технологий создания осевых, сдвиговых и изгибных пакетных актюаторов для режимов работы в статическом режиме и на резонансной частоте на основе объемной пьезокерамики, пьезоэлектрических пленок и макрОВОЛОКОННЫХ КОМПОЗИТОВ;
- разработка конструктивных и технологических решений по инкорпорированию и монтажу пьезоактюаторов на элементах конструкции изделий РКТ и НКИ.

Чувствительные элементы датчиков физических величин на основе макрОВОЛОКОННЫХ пьезоактюаторов, входящих в состав систем СМР, обладают следующими достоинствами:

- компонент бандажного типа;

- активный материал – серийная пьезокерамика;
- групповой технологический процесс производства;
- высокая повторяемость серийного производства;
- высокая надежность работы в условиях больших деформаций;
- хорошая герметичность конструкции;
- легкая интеграция с изделиями и объектами и имплантация в их конструкции;
- имплантация макроволоконных пьезокомпозитов в структуру волоконно-армированных пластиков и волоконно-металлических ламинатов для создания матричных конструктивных композитов и металлических сот с интегрированными функциями датчиков, актюаторов и генераторов.

Структура системы СМР изделий РКТ и объектов НКИ представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структура системы СМР изделий РКТ и объектов НКИ

Создаваемая система СМР на основе макроволновых пьезоактюаторов должна обладать следующими функциями:

1. Прогнозирование вероятности возникновения и развития нештатных и аварийных ситуаций в процессе наземной и летной эксплуатации РКТ на основе получаемых в режиме реального времени фактических данных о техническом состоянии критически важных конструктивных элементов.
2. Оценка фактического ресурса изделий РКТ в процессе длительной летной и наземной эксплуатации.
3. Обнаружение макро- и микродефектов в конструкционных материалах.
4. Компенсация процессов потенциально опасных вибраций, шумов и механических напряжений управляемым демпфированием.
5. Контроль за накоплением усталостных явлений в конструкционных материалах.
6. Контроль температурного режима конструктивных элементов.
7. Осуществление задач адаптроники.
8. Дистанционная передача данных в режиме реального времени.

В процессе работы планируется создание новых базовых и критических технологий:

- технология изготовления макроволоконных актюаторов и сенсоров на основе прямого и обратного пьезоэффекта;
- технология изготовления сенсоров, сенсорных сетей на основе макроволоконных пьезоактюаторов;
- технология определения величин рабочих нагрузок и параметров окружающей среды, воздействующих на структуру;
- технология определения наличия дефектов, его локализации и определения параметров;
- технология определения механических повреждений, вызванных нагрузками и воздействием окружающей среды;
- технология прогнозирования работоспособности в зависимости от увеличения повреждений;

– технология изготовления систем СМР на основе датчиков и макроволновых актюаторов для осуществления мониторинга работоспособности изделий РКТ и объектов НКИ и выдача управляющих воздействий, компенсирующих деструктивные процессы в режиме реального времени.

Сравнительные характеристики разрабатываемой пьезокерамики и пьезо-МЭМС-актюаторов и аналогов представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Сравнительные характеристики пьезокерамики и аналогов

Наименование характеристики и единица измерения	Значения показателей			
	Объект разработки	Отечественные и зарубежные объекты аналогичного назначения (с указанием моделей фирм, стран, года известности)		
		НЦТС-1 ОАО «Элпа», РФ	APC International, LTD (США)	PI, Великобритания
Точка Кюри, °С	400	175	360	345
Тангенс угла диэлектрических потерь, %	1,0	2,0	1,7	2,0
Пьезоэлектрический модуль, d_{33} , 10^{-12} Кл/Н, 10^{-12} м/В – d_{31} – d_{15}	700 550	–260 550	650 270	550 210
Механическая добротность, Q	1000	–	1000	–
Максимальная нагрузка по креплению на 1 мм толщины, В/мм	Постоянный ток	800	–	800
	Переменный ток	400	–	400
Относительная диэлектрическая проницаемость $K_T = \epsilon_{33}/\epsilon_0$	4000	4000	3400	2400

Таблица 2

Сравнительные характеристики разрабатываемых пьезо-МЭМС-актюаторов и аналогов

Наименование показателей	Значение показателей		
	Объект разработки	Отечественные и зарубежные объекты аналогичного назначения (с указанием моделей, фирм, стран)	
		Отечественный объект	Зарубежный объект
Ход, мм	1...50	до 5,12	до 50
Минимальный шаг перемещения, нм	10,0	–	1,8 мкм
Точность, нм	10,0	–	0,6 мкм
Скорость перемещения максимальная, мм/с	0,5	–	до 150
Напряжение питания, В	минус 30...100	100...150	–
Тяговое усилие, $10 \cdot 10^{-3}$ Н, не менее	350,0	1200 Н (при $U_{пит} = 150$ В)	8 Н
Габаритные размеры (масса) пьезопривода, мм, не более	38 × 22 × 5	Ø16 × 32	(0,47 кг)

Области применения систем СМР представлены на рис. 3.



Рис. 3. Области применения систем СМР

Области применения макроволновых композитов в системах СМР для космической и наземной робототехники представлены в табл. 3.

Таблица 3

Области применения макроволновых композитов в системах СМР для космической и наземной робототехники

Сенсорные устройства захвата манипулятора	Датчики тактильные, давления, проскальзывания, приближения, рабочей операции захвата
Силовые сенсорные устройства	Датчики рассогласования в следящем приводе, крутящего момента в шарнире исполнительного органа манипулятора, запястья захвата манипулятора, силы захвата
Сенсорные устройства внешней среды	Датчики и системы технического зрения, акустические, температуры, влажности, газового анализа, столкновения, внешнего удара
Сенсорные устройства позиционирования, положения и ориентации	Датчики направления, курса, крена, тангажа, положения по маркеру, положения по длительности перемещения, оптические, ультразвуковые, инфракрасные
Сенсорные устройства обеспечения безопасности	Датчики обнаружения препятствия, детекторы аварийных ситуаций по напряжению электропитания, давления масла в гидроприводе, выделения тепла, крутящего момента
Сенсорные устройства специального назначения	Датчики целеуказания, наведения, готовности, контроля исполнения

Для разработки и внедрения промышленной технологии необходимо провести следующие мероприятия:

- 1) исследование требований, предъявляемых со стороны систем СМР конструкций РКТ и НКИ к сенсорам и актюаторам на основе пьезоэлектрического эффекта;
- 2) разработку методики выбора пьезоматериала по критериям обеспечения максимальной точности, чувствительности и надежности при изменении температуры эксплуатации, вибрационных и ударных ускорений в широких диапазонах;
- 3) разработку методик обеспечения заданных режимов хода и генерирования силы с исключением возможности деполяризации пьезоматериалов;

4) разработку математических моделей, описывающих влияние гистерезиса, последствия и ползучести пьезоэлементов на процессы деформации пьезоэлементов сенсоров и актюаторов;

5) исследование и разработку технологии, обеспечивающей уменьшение гистерезиса, последствия и ползучести пьезоэлементов;

6) исследование и разработку конструктивных и технологических решений по созданию пьезоэлементов для сенсоров и осевых, сдвиговых и изгибных пьезоактюаторов для имплантации в исследуемые конструктивные элементы;

7) разработку конструктивных и технологических решений по инкорпорированию и монтажу пьезоэлементов в элементы конструкций РКТ и НКИ.

Полученная научно-техническая продукция будет обладать следующими характеристиками:

1) отсутствие технологической зависимости отечественных производителей датчиков на пьезокерамических тонких пленках и пьезокомпозитах, а также макроволоконных композитных пьезоактюаторов от производства импортных компонентов и пьезоматериалов;

2) использование отечественных пьезокомпозитных материалов для создания осевых, сдвиговых, изгибных актюаторов и сенсоров на основе пьезоэффекта, а также технологий инкорпорирования (встраивания) сенсорных и актюаторных элементов конструкции изделий РКТ и НКИ;

3) универсальность при создании схемных решений по обеспечению энергетической совместимости сенсоров и пьезоактюаторов с заданными характеристиками с целью компенсации влияния внешних воздействующих факторов.

В результате разработаны макеты актюаторов на основе пьезоэлектрических пленок со следующими характеристиками:

Относительная деформация, % 0,18;

Генерируемая сила, кН/см² 9;

максимальное управляющее напряжение, В 100.

Макеты пьезоэлектрических пленок для датчиков быстропеременных процессов:

Пьезочувствительность d_{31} , пКл/Н от 2 до 5;

Пьезочувствительность d_{33} , пКл/Н, от 5 до 15;

Диапазон рабочих температур, °С минус 196 до +350.

Макеты пьезоактюаторов на основе макроволоконных композитов со следующими параметрами:

температура точки Кюри T_k °С, 260;

пьезомодуль d_{31} 10–12 Кл/Н не менее 200;

пьезомодуль d_{33} 10–12 Кл/Н не менее 500;

управляющее напряжение, В не более 100.

Результаты

В результате реализации технологии будут созданы импортонезависимые саморегулируемые адаптивные структуры конструкций и оборудования космических аппаратов на основе управляемых свойств материалов с реакцией на внешние воздействия.

Внедрение технологии позволит создать эффективную систему управления колебаниями элементов конструкции. Это обусловлено тем, что для управления аэродинамическими поверхностями, в том числе для демпфирования их колебаний, обусловленных, например, резкими эволюциями летательного аппарата, а также флаттером или бафтингом, требуются, с одной стороны, смещения (усилия) на торцах пьезоэлементов, существенно превышающие смещения, получаемые в конструкциях прецизионных актюаторов, а с другой стороны, адаптивность управляющих воздействий к внешним нагрузкам.

Разработанные пьезоактюаторы найдут применения в системах структурного мониторинга авиакосмической промышленности для контроля вибрации лопасти ротора вертолета, управления тягой руля поворота беспилотного летательного аппарата, плоскостей, контроля и управления вибрацией кронштейнов и выносов элементов конструкции радиотехнических устройств и систем космических аппаратов, контроля и управления вибрацией рулей направления, в промышленности – для измерения деформаций изделий, в системе управления станка

точечной сварки, в устройствах позиционирования, контроля вибрации вращающихся валов, турбин и т.п., а также в РКТ для управления трансформируемыми крупногабаритными конструкциями солнечных батарей КА, антенн, радиомачт, солнечного паруса системами позиционирования на основе актюаторов ПКМ с памятью формы и датчиков контроля температуры и положения. Автокалибровка микромеханических акселерометров на основе МЭМС пленочных слоистых секционных или несекционных пьезоактюаторов со встроенными датчиками с обратной связью. Позиционирование поворотного элемента бортовой антенны для микроперемещений системой на основе монолитных и наборных пьезокерамических пьезоактюаторов с блоками питания, мультипликаторами и датчиками состояния.

Список литературы

1. 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.
2. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А., Баранов А. С. [и др.]. Имитационное моделирование пьезоэлектрического датчика давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 1. С. 20–28.
3. Баринов И. Н., Кучумов Е. В., Волков В. С., Евдокимов С. П. Вопросы разработки и создания адаптивных смарт-материалов на основе пьезоактюаторов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2015. № 8. С. 12–19.
4. Трофимов А. А., Кикот В. В., Фокина Е. А. [и др.]. Исследование технологии создания высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 90–95.
5. Губич И. А., Кикот В. В., Трофимов А. А. [и др.]. Исследование многослойных пьезоактюаторов инжекторов системы управления питанием двигателей внутреннего сгорания // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. тр. XXXIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2021. С. 98–103.
6. Николаев А. В., Блинов А. В., Жуков С. Н. Актуальные проблемы создания систем структурного мониторинга работоспособности автоматических космических аппаратов // Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Проблемы создания служебных и научных систем : сб. тр. Второй науч.-техн. конф. с междунар. участием. Анапа, 2017. С. 92–104.

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
2. Bastrygin K.I., Trofimov A.A., Baranov A.S. et al. Simulation modeling of a piezoelectric pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(1): 20–28. (In Russ.)
3. Barinov I.N., Kuchumov E.V., Volkov V.S., Evdokimov S.P. Issues of development and creation of adaptive smart materials based on piezoactuators. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika = Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2015;(8):12–19. (In Russ.)
4. Trofimov A.A., Kikot V.V., Fokina E.A. et al. Research of technology for creating high-temperature textured materials for the manufacture of multilayer piezoelectric elements of converters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):90–95. (In Russ.)
5. Gubich I.A., Kikot V.V., Trofimov A.A. et al. Investigation of multilayer piezoactuators of injectors of the internal combustion engine power management system. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. tr. XXXIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Problems of automation and control in technical systems : collection of tr. XXXIV International Scientific and Technical conf.* Penza, 2021:98–103. (In Russ.)
6. Nikolaev A.V., Blinov A.V., Zhukov S.N. Actual problems of creating systems for structural monitoring of the operability of automatic spacecraft. *Innovatsionnye avtomaticheskie kosmicheskie apparaty dlya fundamental'nykh i prikladnykh nauchnykh issledovaniy. Problemy sozdaniya sluzhebnykh i nauchnykh sistem: Vtoraya nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Anapa, 2017) = Innovative automatic spacecraft for fundamental and applied scientific research. Problems of creating service and scientific systems : The second scientific and technical conf. with the international participation*. Anapa, 2017:92–104. (In Russ.)

*Информация об авторах / Information about the authors***Алексей Анатольевич Трофимов**

доктор технических наук, профессор,
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, professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
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. Zdobnov

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)

Екатерина Александровна Фокина

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ekaterina.isay1997@gmail.com

Ekaterina A. Fokina

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 15.02.2024

Поступила после рецензирования / Revised 11.03.2024

Принята к публикации / Accepted 08.04.2024