

**Свинолулов Юрий Григорьевич** – Томский политехнический университет; e-mail: sjg@tpu.ru; 634061, Томск, пр. Ленина, 30; тел.: 99138891119; лаборатория ТПМГ; к.т.н.; доцент.

**Машкин Алексей Александрович** – Институт проблем морских технологий ДВО РАН; e-mail: alexej.maschkin@yandex.ru; 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а; тел.: 89609728056; лаб. 09; вед. конструктор.

**Брагин Никита Андреевич** – руководитель проекта.

**Svinolupov Yuri Grigor'evich** – Tomsk Polytechnic University; e-mail: sjg@tpu.ru; 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634061, Russia; phone: 99138891119; TPMG laboratory; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Mashkin Alexey Alexandrovich** – Institute of marine technology problems Feb RAS; e-mail: alexej.maschkin@yandex.ru; 690091, Vladivostok, 5A, Sukhanova street; phone: +79609728056; lab. 09; the vedas. constructor.

**Bragin Nikita Andreevich** – the leader of the project.

УДК 681.586

**В.В. Янчич, А.Е. Панич**

### **ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ**

*С целью повышения точности и достоверности измерения параметров виброускорения проведены исследования и разработка двухпараметрового пьезоэлектрического датчика для систем виброконтроля и диагностики работающего промышленного оборудования. Датчик предназначен для одновременного измерения виброускорений поступательных и крутильных колебаний элементов и узлов контролируемого объекта. Многофункциональный механо-электрический преобразователь датчика установлен на основании его корпуса, содержит инерционный и пьезоэлектрический элементы. Работа датчика основана на возникновении в пьезоэлементе деформаций растяжения-сжатия и сдвига при воздействии поступательного и углового ускорений. Для выделения электрических сигналов, вызванных разными типами деформации, пьезоэлемент имеет два слоя с продольной и тангенциальной поляризацией. Характер распределения механических напряжений, электрических полей и зависимость основных технических характеристик датчика от размеров элементов преобразователя исследованы на математической модели методом конечных элементов. Полученные результаты использованы при разработке и оптимизации конструкции. Основные технические характеристики датчика: коэффициент преобразования поступательного ускорения  $5 \text{ нКл}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{с}^2$ ; коэффициент преобразования углового ускорения  $0,135 \text{ нКл}\cdot\text{рад}^{-1}\cdot\text{с}^2$ ; частота продольного установочного резонанса 21 кГц; частота крутильного установочного резонанса 14 кГц; рабочий диапазон частот при измерении поступательного ускорения от 1 до 6000 Гц; рабочий диапазон частот при измерении углового ускорения от 1 до 4000 Гц; рабочий диапазон температур от минус 60 до +200 °С. Разработан также вариант со встроенным усилителем. Датчик предназначен для эксплуатации в промышленных условиях на нефтеперерабатывающем и энергоснабжающем оборудовании, железнодорожном транспорте, а также в других областях техники. Применение двухпараметрового датчика вместо двух однопараметровых позволяет проводить измерения поступательного и углового ускорений в единой точке контролируемого объекта.*

*Пьезоэлектрический; датчик; угловое и поступательное ускорение; вибрация; математическая модель.*

V.V. Janchich, A.E. Panich

## TWO-PARAMETER PIEZOELECTRIC SENSOR OF PROGRESSIVE AND ANGULAR ACCELERATION

*To improve the accuracy and reliability of vibroacceleration parameters measurement there was made the research and development of two-parameter piezoelectric sensor for the systems of vibration control and diagnostics of operating industrial equipment. The sensor is designed for the simultaneous measurement of vibroacceleration of progressive and torsional vibrations of the elements and components of the controlled object. Multifunctional mechanical-electrical sensor's converter is installed on the basis of its case. It comprises inertial and piezoelectric elements. The work of the sensor is based on occur of the tension-compression strains in piezoelement and shear from the influence of translational and angular accelerations. Piezoelement has two layers of longitudinal and tangential polarization to segregate the electrical signals caused by different types of deformation. The distribution pattern of mechanical stresses, electric fields, and dependence of main technical characteristics of the sensor are researched on the mathematical model of finite element method. The results are used in the design and optimization of construction. The main technical characteristics of sensor: progressive acceleration sensitivity –  $5 \text{ pC}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^2$ ; angular acceleration sensitivity –  $0,135 \text{ pC}\cdot\text{rad}^{-1}\cdot\text{s}^2$ ; longitudinal resonance frequency –  $21 \text{ kHz}$ ; torsional resonance frequency –  $14 \text{ kHz}$ ; working frequency range when measuring progressive acceleration – from 1 to 6000 Hz; working frequency range when measuring angular acceleration – from 1 to 4000 Hz; workin temperature range – from minus 60 to plus 200 °C. The second option of sensor includes built-in amplifier. The sensor is designed to operate in industrial conditions at the refinery and power-generating equipment, railway transport and other technical areas. Using of one two- parameter sensor instead of two one- parameter sensors enables measurements of progressive and angular accelerations in single point of the controlled object.*

*Piezoelectric; sensor; progressive and angular acceleration; vibration; mathematical model.*

**Введение.** Одной из основных причин аварий промышленного оборудования и других сложных технических устройств является отсутствие достоверной информации о вибрационном состоянии динамических объектов, подверженных разрушающему действию вибрации [1].

В настоящее время для измерения параметров виброколебаний в аппаратуре виброконтроля, мониторинга и диагностики наиболее широко применяются пьезоэлектрические датчики вибрации (ПДВ). По сравнению с другими типами датчиков, они обладают такими важными преимуществами, как широкими рабочими диапазонами частот и температур, высокой надежностью и стойкостью к внешним воздействиям [2, 3]. Выходной сигнал (заряд, напряжение) ПДВ, пропорциональный виброускорению, может быть преобразован электрическим способом в сигнал, соответствующий виброскорости или виброперемещению [4].

Несмотря на постоянное совершенствование ПДВ, их метрологические и эксплуатационные характеристики далеко не всегда удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям [5, 6]. В связи с увеличением контролируемых параметров технически сложных объектов, наряду с дальнейшим улучшение точностных, эксплуатационных и надежностных характеристик датчиков, заметно возрастает потребность в расширении их функциональных возможностей [7, 8].

Очевидно, что для решения поставленных задач требуется новый подход к конструированию датчиковой аппаратуры.

**Постановка задачи.** В качестве одного из путей дальнейшего развития ПДВ может рассматриваться применение интегрированных многофункциональных преобразователей [9, 10], на основе которых возможно выполнение пьезоэлектрических датчиков с широкими функциональными возможностями, в том числе и многопараметровые, способные измерять значения нескольких физических величин или параметров [11–14]. Целью работы явилась разработка двухпараметрового

ПДВ предназначенного для одновременного измерения виброускорений поступательных и крутильных колебаний элементов и узлов контролируемого объекта. Многофункциональный механо-электрический пьезоэлектрический преобразователь датчика должен преобразовывать эти ускорения в пропорциональные электрические сигналы, поступающие в измерительную систему по двум отдельным каналам.

**Разработка и испытание конструкции.** Преобразователь [15] (рис. 1) содержит инерционный элемент 1, играющий роль сейсмической массы, и двухслойный пьезоэлектрический элемент 2 с электродами на торцах, выполненный из пьезокерамики. Слой 2.1 пьезоэлемента имеет продольное направление поляризации, а слой 2.2 – тангенциальное. Преобразователь установлен через изолятор 3 на основании 4 корпуса датчика.

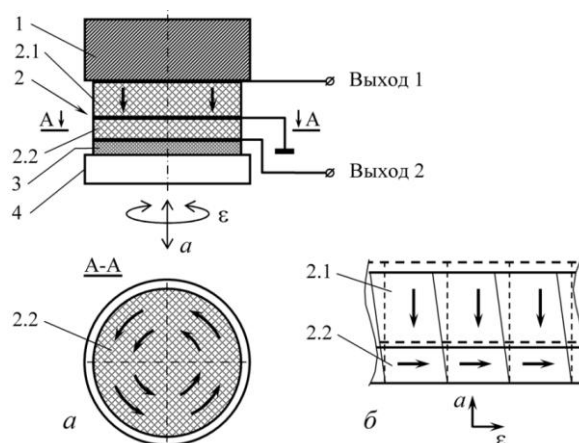


Рис. 1. Схема преобразователя (а) и характер деформации пьезоэлектрического элемента (б): 1 – инерционный элемент; 2 – пьезоэлектрический элемент; 2.1 – продольно поляризованный слой; 2.2 – тангенциально поляризованный слой; 3 – изолятор; 4 – основание; направление поляризации показано стрелками

Воздействие на преобразователь ускорения поступательных колебаний  $a$  и углового ускорения крутильных колебаний  $\epsilon$  одновременно создает в пьезоэлементе деформации растяжения-сжатия и сдвига (рис. 1,а). При этом слоем 2.1 за счет пьезомодуля  $d_{33}$  генерируется заряд, пропорциональный только продольной деформации, а слоем 2.2 – только деформации сдвига за счет пьезомодуля  $d_{15}$ . Сигнал от поступательного ускорения на выходе 1, при всех прочих равных условиях, пропорционален эффективной сейсмической массе, а сигнал от углового ускорения на выходе 1 пропорционален ее эффективному моменту инерции относительно оси вращения.

Исследование пространственной электроупругой модели двухпараметрового ПДВ с целью оптимизации параметров и конструкции проведено методом конечных элементов, реализованным в программе ANSYS Multiphysics [16, 17]. Такое моделирование позволяет с высокой степенью достоверности определять характер распределения механических напряжений и электрических полей, а также зависимость основных технических характеристик от свойств материалов и размеров элементов преобразователя [18]. При моделировании максимальные размеры элементов преобразователя выбраны согласно внутренним размерам корпуса датчика и их диаметр не должен превышать 18 мм.

Исследовались зависимости частоты продольного установочного резонанса  $f_n$ , частоты крутильного установочного резонанса  $f_k$ , коэффициента преобразования поступательного ускорения  $K_n$ , коэффициента преобразования углового ускорения  $K_y$  от диаметра инерционного элемента  $d_n$  в пределах от 10 до 18 мм и общей высоты пьезоэлектрического элемента  $h_n$  от 2 до 5 мм. Высота инерционного элемента 5 мм, диаметр пьезоэлектрического элемента 10 мм, размеры изолятора  $\varnothing 10 \times 1,5$  мм и основания  $\varnothing 27 \times 18$  мм полагались неизменными. Для упрощения модели считалось, что все элементы конструкции жестко соединены между собой по граничным поверхностям, а выбранные размеры основания модели по продольной и поперечной жесткостям обеспечивают его эквивалентность основанию реального датчика.

Некоторые результаты моделирования с учетом экспериментально определенных поправок на реальные межэлементные граничные условия приведены на рис. 2.

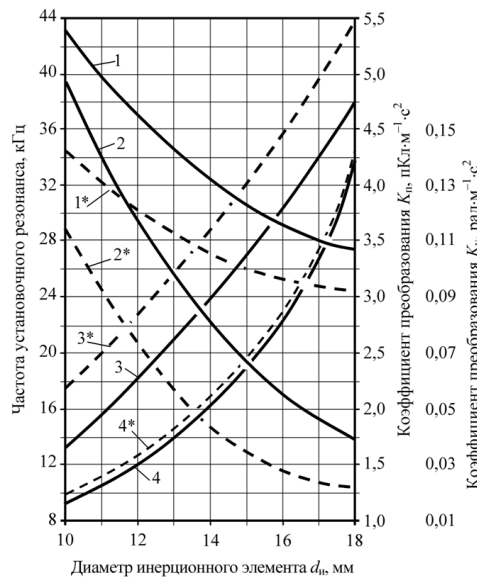


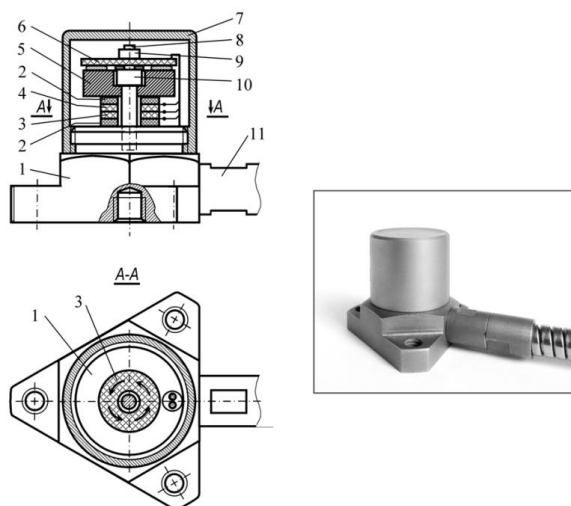
Рис. 2. Влияние размеров элементов преобразователя на характеристики ПДВ:  
 1 –  $f_n(d_n)$ ,  $h_n = 2$  мм; 2 –  $f_k(d_n)$ ,  $h_n = 2$  мм; 3 –  $K_n(d_n)$ ,  $h_n = 2$  мм; 4 –  $K_n(d_n)$ ,  
 $h_n = 2$  мм; 1\* –  $f_n(d_n)$ ,  $h_n = 5$  мм; 2\* –  $f_k(d_n)$ ,  $h_n = 5$  мм; 3\* –  $K_n(d_n)$ ,  $h_n = 5$  мм;  
 4\* –  $K_n(d)$ ,  $h_n = 5$  мм

Как следовало ожидать, увеличение диаметра инерционного элемента, связанное с ростом эффективных значений сейсмической массы и момента инерции, одновременно приводит к повышению коэффициентов преобразования и снижению резонансных частот закрепленного на контролируемом объекте датчика. В данном случае, повышение частоты крутильного резонанса с целью расширения рабочего диапазона в сторону высоких частот, без снижения коэффициентов преобразования по заряду, может достигаться путем увеличения крутильной жесткости колебательной системы за счет уменьшения высоты пьезоэлемента.

С учетом результатов моделирования и предварительного макетирования разработаны два варианта двухпараметрового ПДВ, отличающихся наличием встроенного двухканального согласующего зарядового усилителя, выходы которого совмещены с питанием.

В конструкции датчика (рис. 3) использованы следующие материалы: пьезоэлектрический элемент выполнен из пьезокерамики ЦТС-83Г с максимальной рабочей температурой около 300 °С, пьезомодулями  $d_{33}$  не менее  $270 \cdot 10^{-12}$  Кл·Н<sup>-1</sup> и  $d_{15}$  не менее  $378 \cdot 10^{-12}$  Кл·Н<sup>-1</sup> [19, 20]; инерционный элемент – из сплава ВНМЗ-2 с плотностью 17600 кг·м<sup>-3</sup> и модулем упругости  $415 \cdot 10^9$  Па; изоляторы – из алундовой керамики ВК95 с модулем упругости  $246 \cdot 10^9$  Па; корпус – из нержавеющей стали 25Х13Р2. Выводы сигналов датчика, не содержащего встроенный согласующий усилитель, выполнены антивибрационным экранированным кабелем АВКТ-6 в защитном металлорукаве.

Упругое поджатие элементов конструкции преобразователя осуществляется резьбовой шпилькой и гайкой. На эту же шпильку установлена плата двухканального усилителя. Для исключения резонансных колебаний платы зазор между инерционным элементом и платой заполнен силиконовым герметиком. С целью повышения помехозащищенности все электрические цепи датчика изолированы от корпуса. Для удобства монтажа на контролируемом объекте предусмотрено использование двух модификаций корпуса с фланцевым креплением –  $\varnothing 40 \times 35$  мм с тремя крепежными отверстиями, расположенными по окружности диаметром 30,6 мм и  $\varnothing 45 \times 35$  мм с отверстиями по окружности диаметром 36 мм. Соответственно масса датчика не превышает 120 и 145 г.



*Рис. 3. Конструкция двухпараметрового ПДВ со встроенным усилителем: 1 – основание; 2 – изолятор; 3 – слой пьезоэлемента с тангенциальной поляризацией; 4 – слой пьезоэлемента с продольной поляризацией; 5 – инерционный элемент; 6 – плата усилителя; 7 – крышка; 8 – шпилька; 9, 10 – гайка; 11 – втулка кабеля*

Вариант 1 ПДВ с длиной кабеля 1,5 м выполнен без встроенного согласующего усилителя. В варианте 2 использовался встроенный согласующий двухканальный зарядовый усилитель с коэффициентом преобразования  $4,6$  мВ·пКл<sup>-1</sup>. Основные характеристики вариантов двухпараметровых ПДВ согласуются с результатами расчетов и представлены в табл. 1.

Таблица 1

## Технические характеристики вариантов датчиков

Наименование	Вариант 1	Вариант 2
Коэффициент преобразования поступательного ускорения, пКл·м <sup>-1</sup> ·с <sup>2</sup> мВ·м <sup>-1</sup> ·с <sup>2</sup>	5,0 5,0	– 23,0
Коэффициент преобразования углового ускорения, пКл·рад <sup>-1</sup> ·с <sup>2</sup> мВ·рад <sup>-1</sup> ·с <sup>2</sup>	0,135 0,15	– 0,62
Частота продольного установочного резонанса, кГц	21	
Частота крутильного установочного резонанса, кГц	14	
Диапазон частот измерения поступательного ускорения, Гц	1–6000	2–6000
Диапазон частот измерения углового ускорения, Гц	1–4000	2–4000
Рабочий диапазон температур °С	От минус 60 до +200	От минус 40 до +85
Напряжение питания усилителя, В	–	12
Потребляемый ток, мА	–	2

**Заключение.** Разработанный двухпараметровый ПДВ предназначен для эксплуатации в промышленных условиях на нефтеперерабатывающем и энерговырабатывающем оборудовании, железнодорожном транспорте, а также в других областях техники. Его технические характеристики соответствуют современным требованиям, предъявляемым к датчико-преобразующей аппаратуре [1, 5, 7, 8]. Применение одного двухпараметрового датчика вместо двух обычных однопараметровых позволяет проводить измерения поступательного и углового ускорений в единой точке контролируемого объекта, использовать одну общую кабельную линию связи. Стоимость двухпараметрового датчика приблизительно в 1,7 раза меньше стоимости двух аналогичных однопараметровых. Прямые отечественные и зарубежные аналоги не известны.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
2. Бозуш М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 3). – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. – 346 с.
3. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики / под ред. В.М. Шарапова. – М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
4. Янчик В.В. Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры): монография // Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 7. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с.
5. Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Ефремов Е.В. Состояние и перспективы развития информационно-измерительных средств для измерения, контроля и диагностики изделий РКТ и других видов техники // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Информационно-измерительная техника». – М.: РУНД, 2014. – С. 113-123.

6. Янчик В.В., Панич А.Е., Янчик В.В. О возможности реализации интегрированных многофункциональных преобразователей пьезоэлектрических датчиков физических величин // Сб. тр. VII Междунар. науч.-технич. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. – С. 129-132.
7. Горюш А.В., Панов Д.В., Рубцов И.С. Датчиковая аппаратура для измерения, контроля, диагностики и управления физических параметров в РКТ // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Информационно-измерительная техника». – М.: РУНД, 2014. – С. 83-112.
8. Дмитриенко А.Г., Блинов А.В., Трофимов А.Н. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. – 2012. – № 2. – С. 14-19.
9. Янчик В.В., Панич А.Е., Янчик В.В. Перспективы применения интегрированных многофункциональных преобразователей в пьезоэлектрических датчиках механических величин // Инженерный вестник Дона. – 2010. – № 3. – URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/209/>.
10. Янчик В.В., Янчик В.В. Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития): монография. – LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2013. – 142 с.
11. Янчик В.В., Дженя Д.В., Янчик В.В. Пьезоэлектрические двухдиапазонные акселерометры // Сб. тез. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 54-59.
12. Янчик В.В., Панич А.Е. Управление характеристиками преобразователями датчиков с интегрированными многофункциональными преобразователями // Матер. V Междунар. конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 329-334.
13. Янчик В.В. Монолитный пьезоэлектрический преобразователь усилия с функцией калибровки // Сб. тр. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 59-62.
14. Янчик В.В., Дженя Д.В., Янчик В.В. Пьезоэлектрические акселерометры с двумя динамическими и частотными диапазонами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 3 (27). – С. 127-134.
15. Янчик В.В., Панич А.Е. Двухпараметровый пьезоэлектрический преобразователь // Сб. тр. Междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 179-180.
16. Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении: монография // Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 6. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. – 240 с.
17. Бозуш М.В. Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. – М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
18. Янчик В.В., Митько В.Н. Исследование механических напряжений и электрических полей в пьезоэлектрическом преобразователе акселерометра методом конечных элементов // Сб. тез. VIII Всерос. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 50-54.
19. Горюш А.В., Панич А.Е., Сви́рская С.Н., Янчик В.В. Перспективы развития пьезоэлектрических датчиков механических величин для РКТ и других областей // Сб. тр. науч.-техн. конф. «Информационно-измерительная техника». – М.: РУНД, 2014. – С. 282-293.
20. Янчик В.В., Панич А.Е., Сви́рская С.Н. Критерии выбора пьезокерамических материалов для датчиков механических величин // Сб. тр. II междунар. молодежной научной конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»: в 2 т. Т. 1. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 156-164.

#### REFERENCES

1. Kostyukov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin: ucheb. Posobie [Basics of vibroacoustic diagnostics and monitoring of the machines: tutorial]. Omsk: Izd-vo OmGTU, 2011, 360 p.

2. *Bogush M.V.* P'ezoelektricheskie datchiki dlya ekstremal'nykh usloviy ekspluatatsii. (P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. 3) [Piezoelectric sensors for extreme operating conditions. (Piezoelectric instrumentation. Vol. 3.)]. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNTs VSh, 2006, 346 p.
3. *Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V.* P'ezoelektricheskie datchiki [Piezoelectric sensors], Ed. by V.M. Sharapova. Moscow: Tekhnosfera, 2006, 632 p.
4. *Yanchich V.V.* P'ezoelektricheskie vibroizmeritel'nye preobrazovateli (akselerometry): monografiya [Piezoelectric vibromasuring transducers (accelerometers): monograph], P'ezoelektricheskoe priborostroenie [Piezoelectric instrumentation]. Vol. 7. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2010, 304 p.
5. *Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Efremov E.V.* Sostoyanie i perspektivy razvitiya informatsionno-izmeritel'nykh sredstv dlya izmereniya, kontrolya i diagnostiki izdeliy RKT i drugikh vidov tekhniki [Status and prospects of development of metrical tools for measuring, control and diagnostics of rocket and space technique products and other kinds of technique], *Sb. tr. nauch.-tekhn. konf. «Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika»* [Digest of works of the scientific and technological conference «Information and measurement technique»]. Moscow: RUND, 2014, pp. 113-123.
6. *Yanchich V.V., Panich A.E., Yanchich V.V.* O vozmozhnosti realizatsii integrirrovannykh mnogofunktional'nykh preobrazovateley p'ezoelektricheskikh datchikov fizicheskikh velichin [About the realization ability of integrated multifunctional transducers for piezoelectric sensors of mechanical values], *Sb. tr. VII Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Innovatsionnye protsessy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya i nanotekhnologii»* [Digest of works of the VII International scientific and technological conference «Innovation processes of piezoelectric instrumentation and nanotechnologies»]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2010, pp. 129-132.
7. *Gorish A.V., Panov D.V., Rubtsov I.S.* Datchikovaya apparatura dlya izmereniya, kontrolya, diagnostiki i upravleniya fizicheskikh parametrov v RKT [Sensor equipment for measuring, monitoring, diagnostics and control of physical parameters in rocket and space technique], *Sb. tr. nauch.-tekhn. konf. «Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika»* [Digest of works of the scientific and technological conference «Information and measurement technique»]. Moscow: RUND, 2014, pp. 83-112.
8. *Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N.* Tendentsii razvitiya datchikov, preobrazovateley i na ikh osnove sistem izmereniya, monitoringa i kontrolya tekhnicheskikh slozhnykh ob'ektov raketno-kosmicheskoy tekhniki [The development trends of sensors, transducers and based on systems of measuring, monitoring and control of the complex technical objects of rocket and space technique], *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems], 2012, No. 2, pp. 14-19.
9. *Yanchich V.V., Panich A.E., Yanchich V.V.* Perspektivy primeneniya integrirrovannykh mnogofunktional'nykh preobrazovateley v p'ezoelektricheskikh datchikakh mekhanicheskikh velichin [The prospects of applications of the integrated multifunctional transducers in piezosensors of mechanical values], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering journal of Don], 2010, No. 3. Available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2010/209/>.
10. *Yanchich V.V., Yanchich V.V.* Preobrazovateli p'ezoelektricheskikh datchikov mekhanicheskikh velichin (konstruktsii i puti razvitiya): monografiya [The transducers of mechanical values piezosensors (constructions and development ways): monograph]. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Deutschland, 2013, 142 p.
11. *Yanchich V.V., Dzheniya D.V., Yanchich V.V.* P'ezoelektricheskie dvukhdiapazonnye akselerometry [Piezoelectric double-range accelerometers], *Sb. tez. VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya»* [Digest of theses of the VIII All-Russian scientific and technological conference «The piezoelectric instrumentation actual problems»]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 54-59.
12. *Yanchich V.V., Panich A.E.* Upravlenie kharakteristikami p'ezoelektricheskikh datchikov s integrirrovannymi mnogofunktional'nymi preobrazovatelyami [The characteristics control of piezosensors with integrated multifunctional transducers], *Mater. V Mezhdunar. konf. «Geoinformatsionnye tekhnologii i kosmicheskii monitoring»* [The materials of the V International conference «Geoinformation technologies and space monitoring»]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 329-334.
13. *Yanchich V.V.* Monolitnyy p'ezoelektricheskiiy preobrazovatel' usiliya s funktsiyei kalibrovki [Monolithic piezoelectric transducer of forcing with calibrating calibration function], *Sb. tr. VIII Vseros. nauch.-tekhn. konf. «Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya»* [Digest of works of the VIII All-Russian scientific and technological conference «The piezoelectric instrumentation actual problems»]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 59-62.



14. *Yanchich V.V., Dzheniya D.V., Yanchich V.V.* P'ezoelektricheskie akselerometry s dvumya dinamicheskimi i chastotnymi diapazonami [Piezoelectric accelerometers with two dynamic and frequency bands], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [Institutions of higher education news. Volga region. Technical sciences], 2013, No. 3 (27), pp. 127-134.
15. *Yanchich V.V., Panich A.E.* Dvukhparametrovyy p'ezoelektricheskiy preobrazovatel' [Two-parameter piezoelectric transducer], *Sb. tr. Mezhdunar. molodezhnoy nauchnoy konf. «Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya»* [Digest of works of the International youth scientific conference «The piezoelectric instrumentation actual problems»]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2013, pp. 179-180.
16. *Mit'ko V.N., Kramarov Yu.A., Panich A.A.* Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v p'ezoelektricheskom priborostroenii: monografiya [Mathematical modeling of physical processes in piezoelectric instrumentation: monograph], *P'ezoelektricheskoe priborostroenie* [Piezoelectric instrumentation]. Vol. 6. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2009, 240 p.
17. *Bogush M.V.* Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektropругikh modeley [Piezoelectric sensors design based on spatial electroelastic models]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 312 p.
18. *Yanchich V.V., Mit'ko V.N.* Issledovanie mekhanicheskikh napryazheniy i elektricheskikh poley v p'ezoelektricheskom preobrazovatele akselerometra metodom konechnykh elementov [The research of mechanical stresses and electric fields in piezosensor of accelerometer by the final elements method], *Sb. tez. VIII Vseros. nauch.-tekh. konf. «Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya»* [Digest of theses of the VIII All-Russian scientific and technological conference «The piezoelectric instrumentation actual problems»]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 50-54.
19. *Gorish A.V., Panich A.E., Svirskaya S.N., Yanchich V.V.* Perspektivy razvitiya p'ezoelektricheskikh datchikov mekhanicheskikh velichin dlya RKT i drugikh oblastey [The development prospects of piezosensors of mechanical values for rocket and space technique and other fields], *Sb. tr. nauch.-tekh. konf. «Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika»* [Digest of works of the scientific and technological conference «Information and measurement technique»]. Moscow: RUND, 2014, pp. 282-293.
20. *Yanchich V.V., Panich A.E., Svirskaya S.N.* Kriterii vybora p'ezokeramicheskikh materialov dlya datchikov mekhanicheskikh velichin [Selection criteria of piezoelectric materials for mechanical values sensors], *Sb. tr. II Mezhdunar. molodezhnoy nauchnoy konf. «Aktual'nye problemy p'ezoelektricheskogo priborostroeniya»* [Digest of works of the II International youth scientific conference «The piezoelectric instrumentation actual problems»]: in 2 vol. Vol. 1. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 156-164.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.П. Науменко.

**Янчич Владимир Владимирович** – Южный федеральный университет; e-mail: vibro1@mail.ru; 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 10; тел.: +79185574729; Институт высоких технологий и пьезотехники; аспирант.

**Панич Анатолий Евгеньевич** – e-mail: aepanich@yandex.ru; тел.: +78632223401; Институт высоких технологий и пьезотехники; д.т.н.; профессор; академик РИА; директор.

**Yanchich Vladimir Vladimirovich** – Southern Federal University; e-mail: vibro1@mail.ru; 10, Milchakova street, Rostov-on-Don, 344090, Russia; phone: +79185574729; Institute of high technologies and piezotechniques; postgraduate student.

**Panich Anatoliy Evgenievich** – e-mail: aepanich@yandex.ru; phone: +78632223401; Institute of high technologies and piezotechniques; dr. of eng. sc.; professor; member of the Russian engineering academy; director.