

В.В. Янчич**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УСКОРЕНИЯ**

Исследования выполнены с целью получения данных, необходимых для повышения точности расчета и оптимизации конструкций пьезоэлектрических датчиков механических величин, которые широко используются для контроля, мониторинга и диагностики сложного оборудования и инженерных сооружений в различных областях техники. Задача исследований состоит в изучении особенностей рабочих деформаций в пьезоэлектрическом электромеханическом преобразователе в области крепления к основанию датчика и оценке их влияния на основные метрологические характеристики. Объектом исследования является электромеханический преобразователь в виде цилиндрического монолитного блока из пьезоэлектрической керамики с отношением высоты к диаметру от 0,33 до 2, закрепленный на основании датчика, на которое воздействует поступательное ускорение вибрационных колебаний со стороны контролируемого объекта. С использованием программного пакета ANSYS Multiphysics исследована математическая модель преобразователя с двумя принципиально разными типами крепления – «свободно-скользящего» и «жесткого». При этом выявлен механизм поперечного механического шунтирования деформации преобразователя в области границы жесткого крепления. Для количественной оценки влияния условий крепления на характеристики преобразователя предложены «коэффициент влияния крепления» и формула для его определения при различных отношениях высоты к диаметру преобразователя. Для определения влияния крепления преобразователя в реальных конструкциях датчиков разработана методика и проведены экспериментальные исследования с учетом свойств используемых на практике конструкционных материалов и наиболее часто применяемого упругого поджатия элементов. Установлено, что свойства материала основания и соотношения размеров преобразователя в реальной конструкции датчика могут вызывать изменения его коэффициента преобразования по напряжению до 15 %, коэффициента преобразования по заряду до 22 %, электрической емкости до 9 % и частоты продольного резонанса до 16 %. Влияние граничных условий крепления снижается одновременно с возрастанием относительной высоты преобразователя. Экспериментально получены данные для расчета коэффициента влияния крепления при выполнении основания датчиков из металлов с модулем упругости от 74 до 300 ГПа и плотностью от 2,7 до 17,5 т/м³. Результаты проведенных исследований могут учитываться при конструировании пьезоэлектрических датчиков механических величин.

Пьезоэлектрический датчик; электромеханический преобразователь, математическая модель; крепление; ускорение; вибрация; деформация.

V.V. Yanchich**RESEARCH OF ELECTROMECHANICAL TRANSDUCER'S FASTENING INFLUENCE TO THE ACCELERATION PIEZOSENSOR'S CHARACTERISTICS**

The research is carried out to obtain data necessary to improve calculation accuracy and for construction optimization in piezosensors of mechanical values. These sensors are widely used for control, monitoring and diagnostics of complex equipment and engineering structures. The task of the research is to study the features of working deformations in electromechanical piezotransducer in area of fastening to sensor base and to estimate their influence to the main metrological characteristics. The object of the research is electromechanical transducer in the form of cylindrical monolithic block made of piezoelectric ceramics with height-to-diameter ratio 0.33 to 2. This transducer is fixed on the sensor's base which is affected by progressive acceleration of vibration oscillations from the controlled object. Using the ANSYS Multiphysics software

package a mathematical model of the transducer with two fundamentally different types of fastening – “free sliding” and “rigid” – has been investigated. At the same time the mechanism of transverse mechanical shunting of transducer’s deformation in limit region of the rigid fastening was revealed. “Fastening effect coefficient” and its determination formula for various transducer’s height-to-diameter ratios are proposed for quantitative estimate of fastening conditions influence to transducer’s characteristics. Taking into account the properties of structural materials used in practice and the most frequently used elastic compression of elements a method was developed and experimental studies were carried out to determine the effect of transducer’s fastening in real sensor designs. It was found that base material properties and transducer dimensions ratio in real sensor design can cause changes in voltage conversion coefficient up to 15%, the charge conversion coefficient up to 22%, electric capacity up to 9% and longitudinal resonance frequency up to 16%. The influence of boundary fastening conditions decreases simultaneously with the increase of transducer’s relative height. The calculating data were obtained experimentally for the fastening effect coefficient when making the sensor’s base of metals with elastic modulus of 74–300 GPa and density of 2700–17700 kg/m³. The results of research carried out can be taken into account when designing piezosensors of mechanical values.

Piezosensor; electromechanical transducer; mathematical model; fastening; acceleration; vibration; deformation.

Введение. Пьезоэлектрические датчики механических величин (вибрационного ускорения, динамического давления, силы) на протяжении последних десятилетий, благодаря своим преимуществам, широко используются для контроля, мониторинга и диагностики сложного оборудования и инженерных сооружений в различных областях техники [1–3]. Несмотря на постоянное совершенствование таких датчиков, их метрологические и эксплуатационные характеристики не всегда удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям [4, 5]. В этой связи, актуальным остается решение задач, направленных на дальнейшее развитие методов расчета и проектирование пьезоэлектрических датчиков.

Целью работы является получение дополнительных данных, необходимых для повышения точности расчета и оптимизации конструкций пьезоэлектрических датчиков механических величин, которые могут учитываться при их проектировании [6].

Задача исследований состоит в изучении особенностей рабочих деформаций в пьезоэлектрическом электромеханическом преобразователе в области крепления к основанию датчика и оценке их влияние на основные метрологические характеристики датчика.

Данные, получены по результатам исследований пьезоэлектрического электромеханического преобразователя, который может использоваться в качестве базовой конструкции для пьезоэлектрических датчиков различного типа, включая многопараметровые и многофункциональные [7, 8].

Исследование математической модели. В общем случае, в зависимости от основного измеряемого параметра и конструктивных особенностей, на электромеханический преобразователь датчика может действовать сила, ускорение или одновременно оба этих воздействия, вызывающие различный характер его деформации [8–10]. Так как работа пьезоэлектрического преобразователя во многом обусловлена характером распределения возникающих в нем механических напряжений, изучению этого вопроса уделено особое внимание.

Математическое моделирование проводилось с использованием программного пакета ANSYS Multiphysics для конечно-элементных математических моделей, который позволяет учитывать пьезоэлектрические свойства базового материала преобразователей и обеспечивает широкие возможности их численного расчета [6, 11]. Частота продольного установочного резонанса определялась методом модального анализа ANSYS.

Объектом исследования являлся преобразователь в виде монолитного блока диаметром D и высотой H с электродами на торцах, выполненный из пьезоэлектрической керамики ЦТС-19 и наполяризованный в осевом направлении [12]. Один из торцов блока закреплен на базе – эквиваленте основания датчика. Считалось, что модуль упругости базы и ее масса в 10 раз больше чем у блока.

Исследовались случаи движения базы вдоль продольной оси блока при ускорении $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-2}$. Рассматривалась квазистатическая осесимметричная задача для двух типов крепления блока к сопрягаемой поверхности базы. При первом типе крепления («свободно-скользящее» крепление) исключалось перемещение точек блока относительно основания по продольной оси, но допускалось их свободное скольжение по сопрягаемой поверхности базы. При втором типе крепления («жесткое» крепление) на сопрягаемой поверхности исключалось относительное смещение точек базы и блока.

На рис. 1, в качестве примера для этих случаев крепления, показаны характер деформации блока $\varnothing 10 \times 10 \text{ мм}$ (недеформированное состояние обозначено пунктиром, масштаб деформации для наглядности увеличен) и возникающие при этом механические напряжения на частоте много меньшей собственной частоты системы.

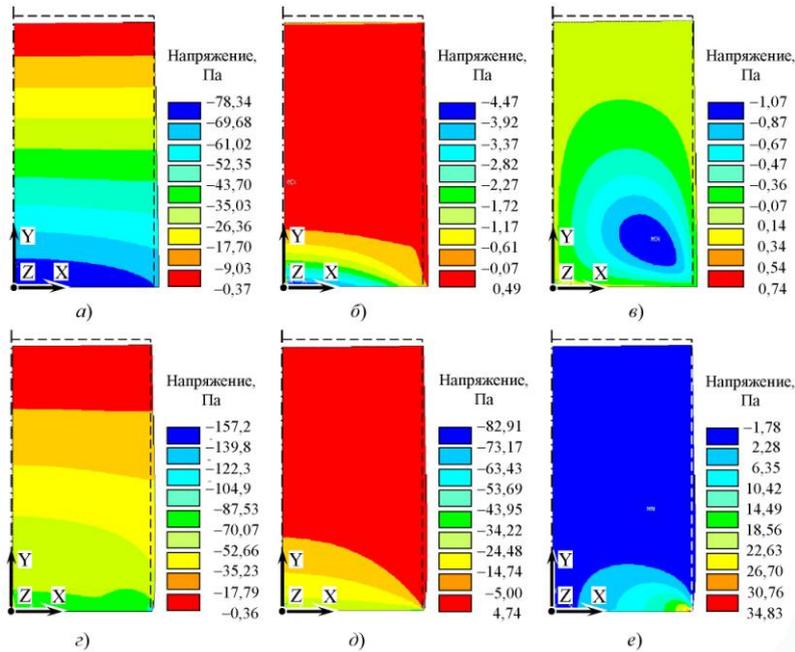


Рис. 1. Характер деформации блока и механические напряжения под воздействием продольного ускорения при свободно-скользящем (а–в) и жестком (г–е) способах крепления блока: а, г – продольные напряжения σ_z ; б, д – поперечные напряжения σ_x ; в, е – сдвиговые напряжения σ_{xy}

Видно, что граничные условия крепления блока оказывают влияние на характер его деформации и на возникающие в нем механические напряжения, особенно вблизи контакта с базой. Как показали результаты расчета, влияющие отличия деформаций блока находятся в слое высотой $h \approx 0,333D$ (D диаметр блока) (рис. 2), что соответствует принятому при расчете значению коэффициента Пуассона [13] пьезоэлектрической керамики.

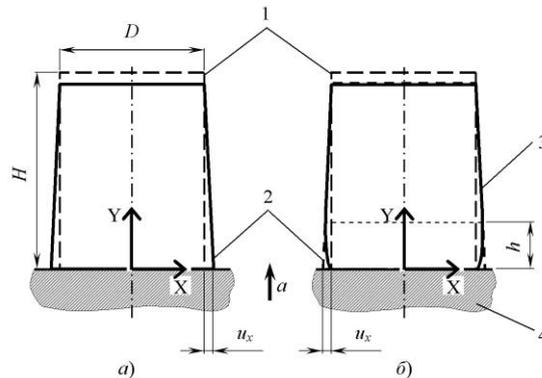


Рис. 2. Деформация монолитного блока при свободно-скользящем (а) и жестком (б) креплении на базе: 1 – исходная конфигурация блока; 2 – конфигурация блока при воздействии ускорения a в случае свободно-скользящего крепления; 3 – конфигурация блока при воздействии ускорения a в случае жесткого крепления; 4 – база; u_x – смещение точек блока

Поперечное механическое шунтирование деформации блока при его жестком креплении приводит к снижению коэффициента преобразования по заряду, электрической емкости и частоты продольного установочного резонанса, которая определяет верхнюю границу рабочего диапазона частот пьезоэлектрического датчика [14–17]. Наблюдаемое возрастание коэффициента преобразования по напряжению связано со снижением электрической емкости вследствие эффекта «зажатия кристалла» [18].

Для количественной оценки влияния на характеристики преобразователя поперечного механического шунтирования предложен коэффициент влияния крепления (КВК) $k_k = A_{жк} / A_{ск}$ (здесь $A_{жк}$ – характеристика преобразователя при жестком креплении, $A_{ск}$ – соответствующая характеристика при свободно-скользящем креплении).

В табл. 1 приведены рассчитанные значения КВК, а на рис. 3 показана зависимость характеристик от отношения высоты H к диаметру блока D .

Таблица 1

Рассчитанные значения КВК при различных отношениях высоты H к диаметру D блока

| Отношение H/D | КВК для характеристик преобразователя | | | |
|-----------------|---|---------------------------------------|-----------------------|---|
| | коэффициента преобразования по напряжению | коэффициента преобразования по заряду | электрической емкости | частоты продольного установочного резонанса |
| 0,333 | 0,823 | 0,757 | 0,930 | 1,118 |
| 0,50 | 0,882 | 0,838 | 0,953 | 1,079 |
| 0,750 | 0,921 | 0,892 | 0,969 | 1,052 |
| 1,0 | 0,941 | 0,919 | 0,977 | 1,039 |
| 1,25 | 0,953 | 0,935 | 0,981 | 1,031 |
| 1,50 | 0,961 | 0,946 | 0,984 | 1,026 |
| 1,75 | 0,966 | 0,954 | 0,985 | 1,022 |
| 2,0 | 0,971 | 0,959 | 0,988 | 1,020 |

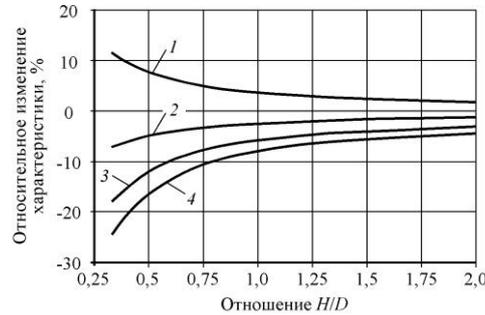


Рис. 3. Влияние отношения высоты H к диаметру D блока на характеристики преобразователя: 1 – частота продольного установочного резонанса; 2 – электрическая емкость; 3 – коэффициент преобразования по напряжению; 4 – коэффициент преобразования по заряду

При близких поперечном и продольном размерах блока отличия его характеристик для рассмотренных случаев крепления не превышают 10 %. Однако, при снижении отношения высоты блока к его диаметру, разница становится все более существенной. Значение КВК для блока с отношением $H/D \geq 0,333$ при жестком креплении к базе может быть определено из формулы:

$$k_{\kappa,i} = \frac{h(k_{h,i} + \frac{H}{h} - 1)}{H} = \frac{hk_{h,i} + H - h}{H}, \quad (1)$$

где $h = 0,333D$, $k_{h,i}$ – КВК для слоя высотой h (индекс « i » обозначает соответствующую характеристику преобразователя).

Рассчитанные значения $k_{h,i}$ составляют: $k_{h,U} = 0,823$ для коэффициента преобразования по напряжению, $k_{h,Q} = 0,757$ для коэффициента преобразования по заряду, $k_{h,C} = 0,9298$ для электрической емкости, $k_{h,f} = 1,1179$ для частоты продольного установочного резонанса.

Так как численное значение $h/D = 0,333$ соответствует среднему справочному значению коэффициента Пуассона пьезоэлектрической керамики ЦТС-19, формула (1) может быть представлена в виде:

$$k_{\kappa,i} = \frac{\mu D(k_{h,i} + \frac{H}{\mu D} - 1)}{H} = \frac{\mu Dk_{h,i} + H - \mu D}{H}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона ПКМ.

Следует отметить, что на практике условия крепления преобразователя всегда будут отличаться от принятых в рассмотренной модели. При этом его деформируемое состояние будет зависеть от механических свойств контактирующих тел, продольной и сдвиговой контактных жесткостей на границе сопрягаемых поверхностей, геометрических параметров основания и других факторов, которые в полном объеме невозможно учесть при моделировании.

Экспериментальное исследование. Целью экспериментального исследования являлась количественная оценка КВК для случаев, приближенных к практическому выполнению датчиков.

Поскольку для определения КВК необходимы данные, соответствующие свободно-скользящему и жесткому креплению преобразователя, в идеальном случае не реализуемые на практике, разработаны способы, позволяющие максимально приблизиться к таким типам крепления.

Для измерения коэффициентов преобразования и электрической емкости при имитации свободно-скользящего крепления испытуемый преобразователь в виде продольно поляризованного монолитного блока 4 (рис. 4,а) из пьезоэлектрической керамики с электродами 5 на торцах. Блок упруго поджат к основанию 7 через прокладку 6 резьбовой шпилькой 1 с гайкой через пружину 2, изолированную от электрода изолятором 3. Прокладка 6 высотой $h_n > 3,33D$, выполненная из той же неполяризованной пьезоэлектрической керамики, практически исключает поперечное механическое шунтирование в примыкающей к ней области преобразователя [19] и обеспечивает условия, максимально приближенные к его свободно-скользящему креплению.

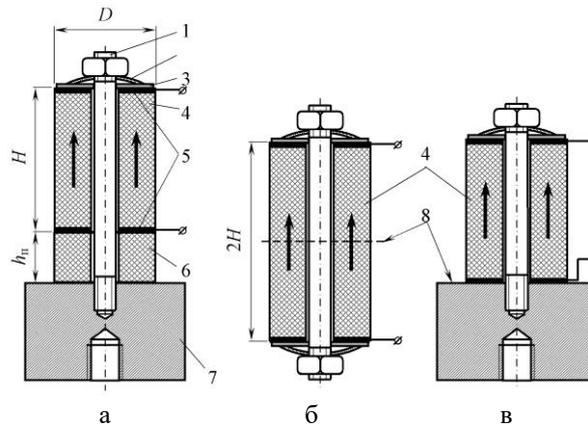


Рис. 4. Конструктивные схемы исследуемых образцов при испытании в режимах свободно-скользящего (а, б) и жесткого (в) крепления; направление поляризации показано стрелками

При определении частоты продольного установочного резонанса преобразователей в режиме, имитирующем свободно-скользящее крепление, измерялась частота резонанса блока с симметрично расположенными элементами крепления (рис. 4,б), который является полуволновым вибратором высотой $2H$ с узловой плоскостью 8. Частота его резонанса равна частоте четвертьволнового вибратора высотой H при свободно-скользящем креплении. При измерении характеристик преобразователя с реально выполненным жестким креплением использовалась схема согласно рис. 4,в.

Образцы исследуемых преобразователей имели следующие параметры: монолитный блок 4 преобразователя диаметром $D = 10$ мм с осевым отверстием диаметром 3,2 мм и вожеными серебряными электродами 5 толщиной 10–12 мкм выполнен из пьезоэлектрической керамики ЦТС-19; дискретные значения высоты H составляли 3,3, 5, 7,5, 10, 15, 20 мм; прокладка 6 $\varnothing 10 \times 5$ мм; основание 7 $\varnothing 18 \times 10$ мм из конструкционных материалов, наиболее часто используемых в пьезоэлектрических датчиках (табл. 2); пружины 2 из сплава 36НХТЮ; изоляторы 3 из слюды 0,5 мм. Усилие упругого поджатия элементов составляло 80 и 120 Н, шероховатость сопрягаемых поверхностей элементов $R_a 0,63$.

Таблица 2

Параметры конструкционных материалов, используемых в исследуемых образцах (усредненные справочные значения)

| Материал | Модуль Юнга, ГПа | Модуль сдвига, ГПа | Плотность, кг/м ³ | Коэффициент Пуассона |
|-----------------------|------------------|--------------------|------------------------------|----------------------|
| ПКМ ЦТС-19 | 73 | 27,24 | 7600 | 0,340 |
| Дюралюминий Д16Т | 74 | 27,51 | 2700 | 0,345 |
| Латунь Л62 | 97 | 35,93 | 8430 | 0,350 |
| Сплав титановый ВТ3-1 | 115 | 43,56 | 4500 | 0,320 |
| Сталь 12Х18Н10Т | 200 | 76,34 | 7770 | 0,310 |
| Сплав ВМ 3-2 | 300 | 115,38 | 17700 | 0,30 |

Измерение коэффициентов преобразования образцов при двух типах крепления проводилось с использованием системы эталонной калибровки CS18STF производства СРЕКТРА (ФРГ). Электрическая емкость определялась как отношение $C = K_Q / K_U$ (здесь K_Q – коэффициент преобразования по заряду, K_U – коэффициент преобразования по напряжению).

Частоты продольного резонанса образцов, выполненных в соответствии с рис. 5б и 5в определялась по частотной характеристике модуля проводимости с присоединенной к основанию массой 80 г.

В табл. 3 приведены экспериментально полученные значения КВК для блока высотой $0,333D$ при усилении упругого поджатия 80 Н.

Таблица 3

Экспериментально полученные значения коэффициентов $k_{h,i}$

| Коэффициент $k_{h,i}$ | Материал основания | | | | |
|-----------------------|--------------------|-------|--------|-----------|--------|
| | Д16Т | Л62 | ВТ 3-1 | 12Х18Н10Т | ВМ 3-2 |
| $k_{h,U}$ | 0,997 | 0,998 | 0,993 | 0,894 | 0,857 |
| $k_{h,Q}$ | 1,030 | 1,026 | 0,953 | 0,869 | 0,811 |
| $k_{h,C}$ | 1,033 | 1,028 | 1,021 | 0,972 | 0,946 |
| $k_{h,f}$ | 0,924 | 0,941 | 0,963 | 1,022 | 1,071 |

На рис. 5 показана зависимость характеристик преобразователя от отношения его высоты H к диаметру D и материала основания при усилении упругого поджатия 80 Н.

Из полученных экспериментальных данных следует, что параметры материалов основания, используемых в реальных конструкциях датчиков, приводят к заметному изменению их характеристик. Коэффициент преобразования по напряжению может снижаться до 14 %, коэффициент преобразования по заряду изменяется приблизительно от 3 до минус 19 %, электрическая емкость – от 3 до минус 5 % и частота продольного установочного резонанса – от минус 8 до 7 %.

Влияние граничных условий крепления, применительно к свойствам конструкционных материалов, снижается одновременно с возрастанием относительной высоты преобразователя. Зависимость характеристик от отношения продольного размера преобразователя к поперечному (рис. 5) соответствует формулам (1) и (2).

Характерным является тот факт, что конструкционные материалы с более высокими значениями модуля упругости, вызывают снижение коэффициентов преобразования и электрической емкости, способствуя росту частоты установоч-

ного резонанса. Материалы, по модулю упругости соизмеримые с пьезоэлектрической керамикой, приводят к обратному эффекту, вызываемому расширением приграничного слоя за счет пониженной контактной жесткости [20].

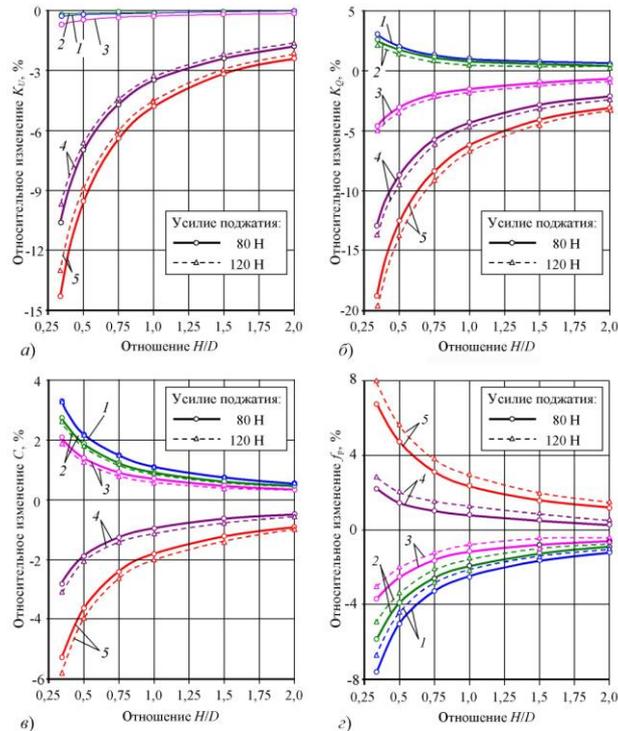


Рис. 5. Зависимость коэффициентов преобразования по напряжению K_U (а), по заряду K_Q , (б), электрической емкости C (в) и частоты установочного резонанса f_p (e) от отношения H к D блока при различных материалах основания: 1 – Д16Т, 2 – Л62, 3 – ВТ 3-1, 4 – 12Х18Н10Т, 5 – ВМ 3-2

Сравнение экспериментальных результатов с полученными при моделировании показывает, что фактическая контактная жесткость на границе сопряжения составляет 0,85–0,9 от абсолютного значения. Это так же подтверждается некоторым влиянием усилия упругого поджатия на характеристики преобразователя.

Заключение. Проведенные исследования позволили количественно оценить влияние геометрических параметров преобразователя и свойств конструкционных материалов основания датчика на его основные характеристики. Так, использование сплава ВМ 3-2 с максимальными значениями модуля упругости и плотности по сравнению с Д16Т, обладающим минимальными значениями этих параметров, позволяет повысить частоту установочного резонанса до 15 %. Однако это неизбежно приводит к снижению коэффициентов преобразования до 14 % по напряжению и до 22 % по заряду.

Экспериментально полученные значения КВК, применительно к различным конструкционным материалам, и аналитические выражения, связывающие КВК с относительными размерами преобразователя в виде монолитного блока, могут использоваться с целью повышения точности расчета основных метрологических характеристик пьезоэлектрических датчиков механических величин на 5–20 %, а также оптимизации их конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Датчики для измерения, контроля, диагностики и управления физических и технологических процессов: справочник: в 2 т. / под общ. ред. А.В. Гориша / под ред. А.Г. Дмитриенко, А.Н. Котова, Ю.Н. Макарова, С.А. Пономарева. Т. 1. Кн. 1. – М.: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012. – 576 с.
2. *Crocker M.J., Arenas J.P.* Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control. – Springer, 2012. – 706 p.
3. *Костюков В.Н., Науменко А.П.* Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. – Омск: ОмГТУ, 2011. – 360 с.
4. *Мокров Е.А.* Состояние, проблемы и пути развития датчикоостроения // Датчики и системы – 2006: Сб. трудов Всероссийской научно-практической конференции (Москва, 30–31 мая 2006 г.). – Пенза: ФНПЦ ФГУП «НИИ физических измерений», 2006. – С. 6-14.
5. *Гориш А.В., Панич А.Е., Свирская С.Н., Янчич 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.
6. *Богущи М.В.* Проектирование пьезоэлектрических датчиков на основе пространственных электроупругих моделей. (Пьезоэлектрическое приборостроение Т. IX.). – М.: Техносфера, 2014. – 312 с.
7. *Янчич В.В., Панич А.Е.* Двухпараметровый пьезоэлектрический датчик поступательного и углового ускорения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2. – С. 191-199.
8. *Янчич В.В., Янчич Вл.В.* Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития). – Saarbrücken, Deutschland: LAP, 2013. – 142 с.
9. *Serridge M., Licht T.R.* Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers: theory and application handbook. – Nerum, Denmark: Brüel and Kjær, 1987. – 150 p.
10. *Levinzon F.* Piezoelectrics Accelerometers with Integral Electronics. – NYC: Springer, 2015. – 168 p.
11. *Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А.* Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 6). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. – 240 с.
12. *Янчич Вл.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.
13. *Han-Chin Wu.* Continuum Mechanics and Plasticity. – Taylor & Francis, 2004. – 704 p.
14. *Янчич В. В.* Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи (акселерометры). (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 7). – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. – 304 с.
15. *Liu B., Tcherniak D., Jacobson N., Olsen M.* Smart Setap and Accelerometer Mounting Check for Vibration Measurements // Sensors and Instrumentation. Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics. – 2016. – Vol. 5. – P. 9-34.
16. *Veber M.* Piezoelektrische Beschleunigungs aufnehmer. – MFF, 2012. – 55 s.
17. Acoustic and vibration transducers. Reliability and precision based on superior technology. – Denmark: Brüel & Kjær. 1996. – 60 p.
18. *Панич А.Е., Тополов В.Ю.* Физика сегнето- и пьезоэлектриков. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. – 171 с.
19. А.с. SU 1103161. Устройство для измерения продольного пьезомодуля / В.К. Доля, О.П. Крамаров, Ю.А. Крамаров. 1984, бюл. № 26.
20. *Robert M. Jones.* Deformation Theory of Plasticity. – Bull Ridge Publ, 2009. – 621 p.

REFERENCES

1. Datchiki dlya izmereniya, kontrolya, diagnostiki i upravleniya fizicheskikh i tekhnologicheskikh protsessov: spravochnik: v 2 t. [Sensors for measurement, control, diagnostics and management of physical and technological processes: handbook in 2 vol.], under the general ed. A.V. Gorisha, ed. by A.G. Dmitrienko, A.N. Kotova, Yu.N. Makarova, S.A. Ponomareva. Vol. 1. B. 1. Moscow: FGBOU VPO MGUL, 2012, 576 p.

2. *Crocker M.J., Arenas J.P.* Engineering Acoustics: Noise and Vibration Control. Springer, 2012, 706 p.
3. *Kostyukov V.N., Naumenko A.P.* Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin [Basics of vibroacoustic diagnostics and monitoring of the machines: tutorial]. Omsk: OmGTU, 2011, 360 p.
4. *Mokrov E.A.* Sostoyanie, problemy i puti razvitiya datchikostroeniya [Condition, problems and development ways of sensor engineering], *Datchiki i sistemy – 2006: Sb. trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Moskva, 30–31 maya 2006 g.)* [Sensors and Systems-2006: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference (Moscow, May 30-31, 2006). Penza: FNPTS FGUP «NII fizicheskikh izmereniy», 2006, pp. 6-14.
5. *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.-tekhn. konf. «Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika»* [Proceedings of the scientific and technical conference "Information and Measurement Technology"]. Moscow: RUND, 2014, pp. 282-293.
6. *Bogush M.V.* Proektirovanie p'ezoelektricheskikh datchikov na osnove prostranstvennykh elektrouprugikh modeley. (P'ezoelektricheskoe priborostroenie T. IX.) [Design of piezoelectric sensors based on spatial electroelastic models. (Piezoelectric instrument making Vol. IX)]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, 312 p.
7. *Yanchich V.V., Panich A.E.* Dvukhparametrovyy p'ezoelektricheskii datchik postupatel'nogo i uglovogo uskoreniya [Two-parameter piezoelectric sensor of progressive and angular acceleration], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2, pp. 191-199.
8. *Yanchich V.V., Yanchich V.V.* Preobrazovateli p'ezoelektricheskikh datchikov mekhanicheskikh velichin (konstruktsii i puti razvitiya) [The transducers of mechanical values piezosensors (constructions and development ways)]. Saarbrücken, Deutschland: LAP, 2013, 142 p.
9. *Serridge M., Licht T.R.* Piezoelectric accelerometers and vibration preamplifiers: theory and application handbook. Nerum, Denmark: Brüel and Kjær, 1987, 150 p.
10. *Levinzon F.* Piezoelectrics Accelerometers with Integral Electronics. NYC: Springer, 2015, 168 p.
11. *Mit'ko V.N., Kramarov Yu.A., Panich A.A.* Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh protsessov v p'ezoelektricheskoy priborostroenii. (P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. 6) [Mathematical modeling of physical processes in piezoelectric instrumentation. (Piezoelectric instrumentation. Vol. 6). Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2009, 240 p.
12. *Yanchich V.V., Mit'ko V.N.* Issledovanie mekhanicheskikh napryazheniy i elektricheskikh poley v p'ezoelektricheskoy 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.-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-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 50-54.
13. *Han-Chin Wu.* Continuum Mechanics and Plasticity. Taylor & Francis, 2004, 704 p.
14. *Yanchich V.V.* P'ezoelektricheskie vibrozmeritel'nye preobrazovateli (akselerometry). (P'ezoelektricheskoe priborostroenie. T. 7) [Piezoelectric vibration measuring transducers (accelerometers). (Piezoelectric instrument making. Vol. 7). Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2010, 304 p.
15. *Liu B., Tcherniak D., Jacobson N., Olsen M.* Smart Setup and Accelerometer Mounting Check for Vibration Measurements, *Sensors and Instrumentation. Proceedings of the 34th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics*, 2016, Vol. 5, pp. 9-34.
16. *Veber M.* Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer. MFF, 2012, 55 p.
17. Acoustic and vibration transducers. Reliability and precision based on superior technology. Denmark: Brüel & Kjær. 1996, 60 p.
18. *Panich A.E., Topolov V.Yu.* Fizika segneto- i p'ezoelektrikov [Physics of ferroelectrics and piezoelectrics]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2009, 171 p.

19. A.s. SU 1103161. Ustroystvo dlya izmereniya prodol'nogo p'ezomodulya [Patent SU 1103161. Ustroystvo dlya izmereniya prodol'nogo piezomodulya [Longitudinal piezomodule], *V.K. Dolya, O.P. Kramarov, Yu.A. Kramarov*. 1984, bull. No. 26.
20. *Robert M. Jones*. Deformation Theory of Plasticity. Bull Ridge Publ, 2009, 621 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. М.В. Богуш.

Янчик Владимир Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: vibro1@mail.ru; г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: +79885344996; институт высоких технологий и пьезотехники; ведущий инженер.

Yanchich Vladimir Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: vibro1@mail.ru; Rostov-on-Don, Russia; phone: +79885344996; Institute of hightechnologies and piezotechniques; leading engineer.