

Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 4 (144). С. 33–39.

Izvestiya of Altai State University. 2025. No 4 (144). P. 33–39.

Научная статья

УДК 535.3:621.317.2

DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-04

Двухпараметровые измерительные преобразователи с логометрическим выходом на базе составных пьезотрансформаторов

Виктор Николаевич Седалищев¹, Роман Владимирович Краев²,
Алексей Валерьевич Сеулеков³, Сергей Владимирович Умбетов⁴

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, sedalischew@mail.ru

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия,
kraev.roma1020@ya.ru

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, seulekov@mail.asu.ru

⁴Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
Барнаул, Россия, eva_09@inbox.ru

Original article

Two-Parameter Measuring Transducers with Ratiometric Output Based on Composite Piezoelectric Transformers

Viktor N. Sedalishchev¹, Roman V. Kraev², Alexey V. Seulekov³, Sergey V. Umbetov⁴

¹Altai State University, Barnaul, Russia, sedalischew@mail.ru

²Altai State University, Barnaul, Russia, kraev.roma1020@ya.ru

³Altai State University, Barnaul, Russia, seulekov@mail.asu.ru

⁴Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, eva_09@inbox.ru

Аннотация. Представлены результаты сравнительного анализа метрологических характеристик вариантов построения двухпараметровых пьезотрансформаторных измерительных преобразователей с логометрическим выходом. Исследования проводились с использованием методов имитационного моделирования. Конструктивно измерительный преобразователь представляет собой составной пьезоэлектрический трансформатор с двумя степенями свободы. Чувствительным элементом преобразователя может являться вибратор, или элемент связи между резонаторами. При изменении параметров чувствительного элемента происходит перераспределение колебательной энергии по степеням свободы, зависящее от характера взаимодействий и уровня связи в системе, добротности резонаторов, степени расстройки их собственных частот. Для формирования выходного сигнала датчика может использоваться отношение выходных напряжений двух пьезотрансформаторов, возбуждаемых на одной частоте, или отношение выходных напряжений с одного пьезотрансформатора, поочередно возбуждаемого на двух разных частотах. Применение определенных режимов связанных колебаний в системе позволяет реализовать необходимый

Abstract. The study presents the results of a comparative analysis of the metrological characteristics related to the various construction options for two-parameter measuring piezoelectric transducers with a ratiometric output. The research is carried out using simulation modeling methods. Structurally, the measuring transducer is a composite piezoelectric transformer with two degrees of freedom. The sensitive element of the transducer can be a vibrator or a coupling element between resonators. When changing the parameters of the sensing element, there is a redistribution of vibrational energy across the degrees of freedom, depending on the nature of interactions and the level of coupling in the system, the goodness of the resonators, and the degree of their natural frequencies detuning. The output signal is generated using the ratio of output voltages of two piezoelectric transformers excited at the same frequency or the ratio of output voltages from one piezoelectric transformer alternately excited at two different frequencies. Specific coupled oscillation modes in the system allow implementing the adjustable necessary sensitivity mechanism for a sensor. Appropriate methods of generating the sensor output

механизм чувствительности датчика, а применение соответствующих способов формирования выходного сигнала датчика позволяет повысить чувствительность и избирательность измерительного процесса.

Ключевые слова: датчик вибрационного типа, логометрический выход, составной пьезотрансформатор, связанные колебания, степень свободы, вязкость, плотность

Для цитирования: Седалищев В.Н., Краев Р.В., Сеулеков А.В., Умбетов С.В. Двухпараметровые измерительные преобразователи с логометрическим выходом на базе составных пьезотрансформаторов // Известия Алтайского государственного университета. 2025. № 4 (144). С. 33–39. DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-04.

Введение

Одной из актуальных задач приборостроения является необходимость создания универсальных, многопараметрических датчиков, применимых для одновременного измерения двух и более физических величин [1, 2, 3, 4, 5]. Очевидно, что при измерении одного из параметров объекта необходимо исключить или существенно уменьшать влияние других его параметров [6, 7, 8, 9, 10]. При использовании датчиков одного типа это является крайне трудной задачей. Чаще всего для этой цели приходится применять два и более разнотипных измерительных устройства.

Например, для измерения вязкости и плотности жидких сред используют два конструктивно отличающихся датчика вибрационного типа. При этом не удастся полностью избавиться от влияния одних параметров среды на результат измерения других ее параметров. В данном случае на результат измерения вязкости жидкости влияет изменение плотности среды, особенно при работе на высоких частотах (используют понятие «квазивязкости» жидкости).

В настоящее время для решения подобных задач все более широко применяют электромеханические измерительные устройства с частотным выходом на основе пьезокварца или с амплитудным выходом на основе пьезокерамики [11, 12, 13, 14, 15]. Одной из их разновидностей являются датчики на базе составных пьезотрансформаторов с двумя и более степенями свободы [16]. Чувствительными элементами таких измерительных преобразователей (ИП) могут являться как непосредственно резонаторы, так и элементы связи между ними. Особенностью измерительных устройств такого типа является то, что в них реализуются нелинейные режимы работы, рациональное использование которых позволяет управлять метрологическими характеристиками, расширять их функциональные возможности.

Основная часть

Целью проведенных исследований является разработка принципов построения ИП на базе составных пьезотрансформаторов, способных обеспечивать высокую чувствительность и избирательность измерения двух параметров объекта с помощью одного датчика. Для ре-

signals help increase the sensitivity and selectivity of the measuring process.

Keywords: vibration type sensor, ratiometric output, composite piezoelectric transformer, coupled oscillations, degree of freedom, viscosity, density

For citation: Sedalishchev V.N., Kraev R.V., Seulekov A.V., Umbetov S.V. Two-Parameter Measuring Transducers with Ratiometric Output Based on Composite Piezoelectric Transformers. *Izvestiya of Altai State University*. 2025. No 4 (144). P. 33–39. (In Russ.). DOI: 10.14258/izvasu(2025)4-04.

шения поставленной задачи предлагается использовать ИП с двумя степенями свободы на базе составных пьезотрансформаторов, обеспечивающих реализацию функции измерительного преобразования $y = f(x, t)$ по отношению к двум параметрам объекта (x, t). Для обеспечения избирательности измерения одного из этих параметров необходимо повысить чувствительность ИП к данному параметру и уменьшить чувствительность к измерению другого его параметра, являющегося в данном случае нежелательным влияющим фактором.

Для анализа вариантов построения двухпараметровых ИП будем использовать коэффициенты относительной чувствительности (КОЧ) и относительной избирательности (КОИ) измерительного процесса:

$$\text{КОЧ} \approx \frac{dy/y}{dx/x}; \quad \text{КОИ} \approx \frac{dy/y}{dy/y} \bigg/ \frac{dx/x}{dt/t}.$$

Для пьезорезонансных датчиков преобладающей является мультипликативная составляющая погрешности измерений, обусловленная изменением электрических и механических характеристик пьезоматериалов во времени, под действием температуры и других дестабилизирующих факторов [14, 15, 16]. Поэтому с целью повышения точности измерений будем использовать логометрический вариант построения измерительной схемы ИП с выходом по отношению двух сигналов, снимаемых с ПЭТ.

Аналитические зависимости, описывающие динамические процессы в нелинейных системах, имеют достаточно сложный вид, не наглядны, что затрудняет оптимизацию конструкции ИП, анализ режимов их работы и оценку метрологических характеристик. Поэтому для исследования метрологических характеристик ИП было применено имитационное моделирование с использованием эквивалентной электрической схемы замещения (ЭЭСЗ) ИП. Модулируемыми параметрами объекта при этом являлись электрические аналоги (L, C, R) соответствующих параметров объекта измерения, таких как, например, плотность, упругость, вязкость жидкой среды [17, 18].

Важными факторами, определяющими особенности распределения колебательной энергии по степеням свободы в системе, являются добротность используемых резонаторов и уровень связи между ними. Из теории колебаний известно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебательной системы ИП с двумя степенями свободы при слабой связи между резонаторами ($\gamma \cdot Q < 1$, где γ — коэффициент

связи, Q — добротность резонаторов) имеет одnogорбый вид. При сильной связи в системе ($\gamma \cdot Q > 1$) ее АЧХ имеет двугорбый вид с резонансами на нормальных частотах синхронизации (НЧС) связанных колебаний резонаторов и провалами АЧХ на их парциальных частотах (ПЧ).

На рисунке 1 приведена АЧХ системы с двумя степенями свободы при сильной связи в системе.

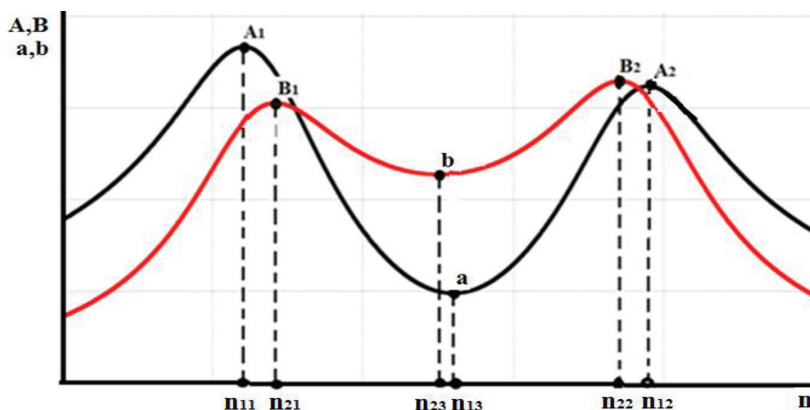


Рис. 1. АЧХ сильно связанной системы с двумя степенями свободы

При анализе вариантов построения ИП использовались следующие параметры связанных колебаний резонаторов и их обозначения:

— $A_1; A_2; B_1; B_2; n_{11}; n_{21}; n_{12}; n_{22}$ — нормальные частоты синхронизации и амплитуды колебаний резонаторов на этих частотах;

— $a; b; n_{13}; n_{23}$ — парциальные частоты и амплитуды колебаний резонаторов на парциальных частотах.

При изменении параметров чувствительного элемента ИП происходит перераспределение колебательной энергии по двум степеням свободы. В качестве таких степеней свободы могут выступать как непосредственно сами взаимосвязанные резонаторы, так и определенные моды связанных колебаний в системе. Это позволяет реализовать два способа формирования выходных сигналов ИП с логотметрическим выходом, принципиально отличающихся по реализуемым механизмам чувствительности и модулируемым параметрам чувствительного элемента.

В первом варианте построения ИП в качестве выходного сигнала ИП будем использовать отношение амплитуд колебаний двух резонаторов на нормальных ($\chi_{AB} = \frac{A}{B}$) и парциальных ($\chi_{ab} = \frac{a}{b}$) частотах синхронизации связанных колебаний в системе.

Во втором варианте построения ИП отношение амплитуд колебаний одного резонатора на двух нормальных и/или парциальных частотах отражает особенности распределения колебательной энергии в системе по этим частотам. При этом в качестве выходного сигнала датчика будем использовать отношение амплитуд колебаний одного из взаимосвязанных резонаторов, поочередно возбуждаемого на двух

нормальных частотах ($\aleph_{AA} = \frac{A_1}{A_2}$), или на нормальной и парциальной частоте ($\aleph_{aa} = \frac{a}{a}$).

На рисунке 2 представлены графические зависимости, отражающие влияние уровня обобщенной связи в системе ($\gamma \cdot Q$) на вид выходных характеристик ИП.

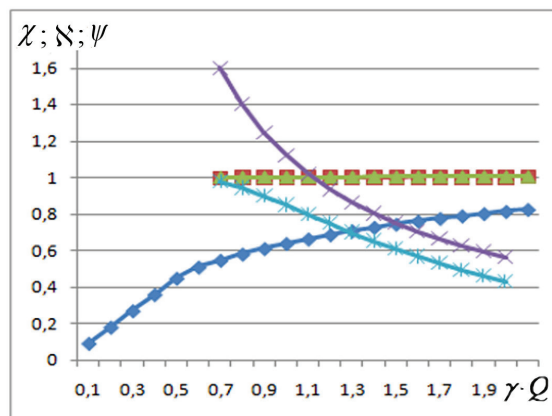


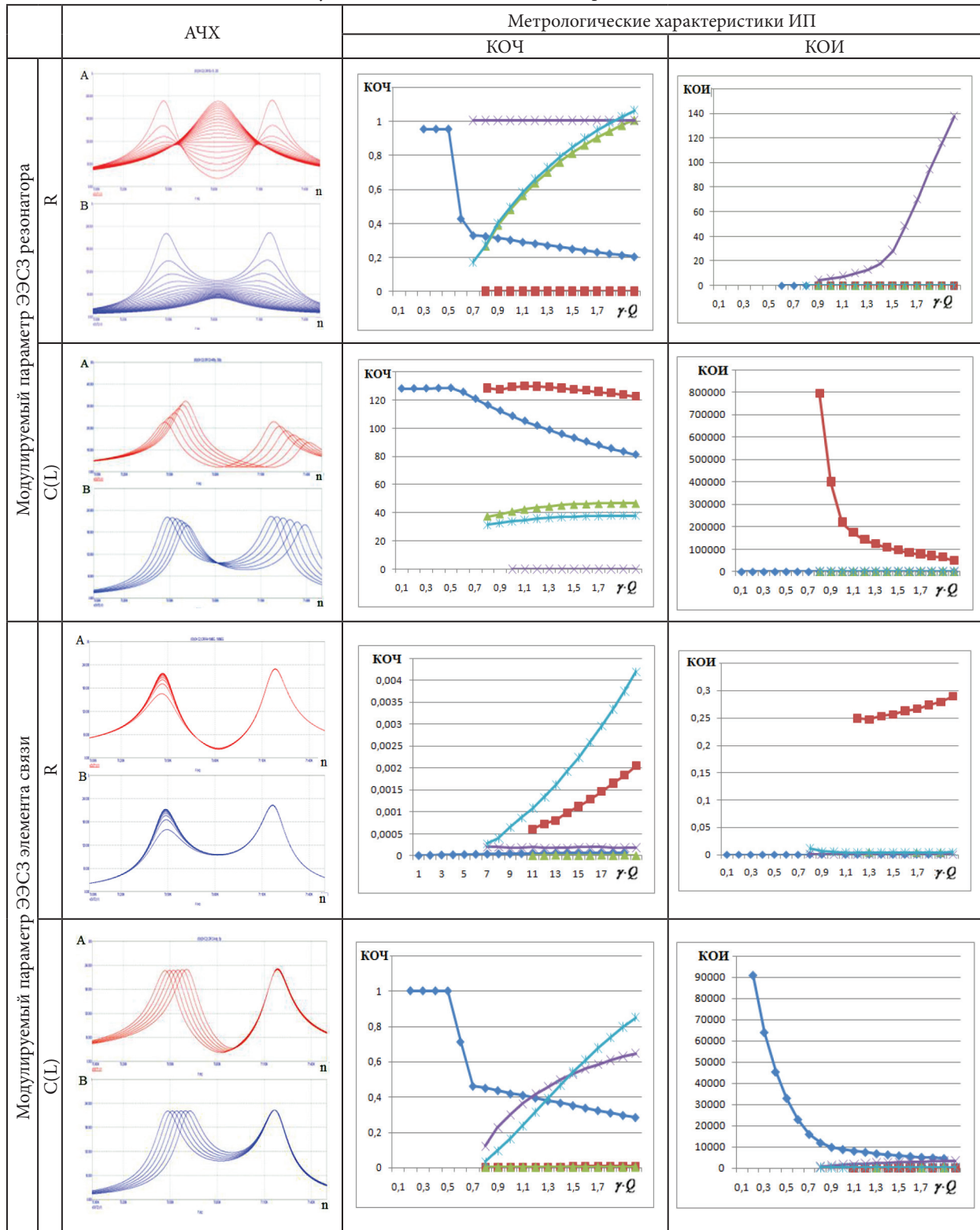
Рис. 2. Влияние уровня обобщенной связи в системе на выходные характеристики ИП

(— χ_{AB} ; — χ_{ab} ; — ψ_{12} ; — \aleph_{AA} ; — \aleph_{aa})

В таблице 1 приведены результаты имитационного моделирования ИП с логотметрическим выходом, отражающие особенности изменения параметров связанных колебаний резонаторов, чувствительности и избирательности измерительного процесса при модуляции параметров эквивалентной электрической схемы замещения двух вариантов построения чувствительного элемента.

Таблица 1

Результаты имитационного моделирования ИП



Цветовое обозначение линий на рисунках для КОЧ и КОИ при выходных сигналах ИП:

— χ_{AB} ; — $|\mathcal{S}_{AA}|$; — Ψ_{12} ; — χ_{ab} ; — \mathcal{S}_{aA}

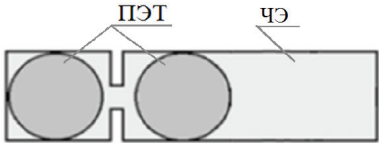
Анализ полученных зависимостей позволил сделать вывод о том, что для создания двухпараметрового датчика с двумя степенями свободы нужно использовать режим сильной связи в системе и резонатор в качестве чувствительного элемента. При этом наиболее высокую чувствительность и избирательность измерения, например, вязкости жидкости и уменьшение влияния на результат измерений ее плотности обеспечивает вариант ИП с выходом по отношению амплитуд колебаний резонаторов, возбуждаемых на парциальной частоте (χ_{ab}). Если, наоборот, требуется повысить чувствительность и избирательность измерения плотности жидкости, то нужно использовать вариант ИП с выходом по от-

ношению амплитуд колебаний одного резонатора, поочередно возбуждаемого на нормальных частотах (\aleph_{AA}) синхронизации связанных колебаний в системе. Это позволит не только повысить чувствительность и избирательность измерения требуемого параметра объекта, но и практически исключить влияние на точность измерений таких дестабилизирующих факторов, как изменение температуры среды, старение пьезокерамики и др.

В таблице 2 представлен вариант конструктивного исполнения двухпараметрового датчика вязкости и плотности жидких сред на базе составных пьезотрансформаторов.

Таблица 2

Варианты исполнения двухпараметрового датчика

Измеряемый параметр среды	Вид выходного сигнала ИП, обеспечивающий повышение		Конструкция чувствительного элемента
	КОЧ	КОИ	
Вязкость	$\aleph_{aA} = U_{13}/U_{11}$	$\chi_{ab} = U_{13}/U_{23}$	
	$\chi_{ab} = U_{13}/U_{23}$		
Плотность	$\aleph_{aA} = U_{13}/U_{11}$	$\aleph_{AA} = U_{11}/U_{12}$	
	$\aleph_{AA} = U_{11}/U_{12}$		

$U_{11}; U_{12}; U_{13}; U_{23}$ — выходные напряжения ПЭТ, пропорциональные амплитудам колебаний резонаторов на соответствующих частотах.

К достоинствам датчиков на базе двух составных пьезотрансформаторов, возбуждаемых на одной общей частоте, можно отнести более высокое быстродействие, так как при этом в процессе измерений не требуется производить переключение частоты возбуждения колебаний. Основным недостатком является необходимость подбора пар пьезоэлементов с близкими характеристиками.

Использование в качестве выходного сигнала двухпараметрического датчика отношения выходных напряжений, снимаемых с одного ПЭТ при переключении рабочих частот, позволяет повысить точность измерений, избавиться от необходимости подбора пьезоэлементов с идентичными характеристиками. К их недостаткам можно отнести снижение быстро-

действия, усложнение и удорожание программно-аппаратной части измерительного устройства.

Заключение

В работе представлены результаты имитационного моделирования ИП с двумя степенями свободы, предложены варианты конструктивного исполнения чувствительного элемента и способы формирования логометрического выходного сигнала двухпараметрового датчика на базе составных ПЭТ, обеспечивающие высокую чувствительность и избирательность измерительного процесса.

Датчики такого типа имеют простую конструкцию, технологичны в изготовлении, надежны в работе, применимы для работы в тяжелых условиях.

Библиографический список

1. Шарапов В.М., Минаев И.Г., Сотула Ж.В. и др. Пьезо-керамические трансформаторы и датчики. Черкасы: Вертикаль. 2010. 278 с.
2. Низаметдинов А.М. Измерение добротности и собственной частоты колебательной системы вибровискозиметрического датчика. // Датчики и системы. 2016. № 10. С. 15–20.
3. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E. K. et al. Reduced Order Models for Resonant Viscosity and Mass Density Sensors // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 220. P. 76–84. DOI: 10.1016/j.sna.2014.09.006
4. Hadidi S., Hassanzadeh A., A Novel Self-Powered, High-Sensitivity Piezoelectric Vibration Sensor Based on Piezoelectric Combo Effect // *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23. No 21. P. 25797–25803. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3317445
5. Lee C. K., Hsu Y. H., Hsiao W. H. et al. Electrical and Mechanical Field Interactions of Piezoelectric Systems: Foundation of Smart Structures-Based Piezoelectric Sensors and Actuators, and Free-Fall Sensors // *Smart Materials and Structures*. 2004. Vol. 13. No 5. P. 1090. DOI: 10.1088/0964-1726/13/5/015
6. Соломин Б.А., Низаметдинов А.М., Черторийский А.А. и др. Миниатюрный вибровискозиметрический датчик повышенной чувствительности и быстродействия // Датчики и системы. 2015. № 7. С. 35–39.
7. Spletzer M., Raman A., Wu A. Q. et al. Ultrasensitive Mass Sensing Using Mode Localization in Coupled Microcantilevers // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88. No 25. P. 254102–1–254102–3. DOI: 10.1063/1.2216889
8. Янчич В.В., Панич А.Е., Янчич Вл.В. О возможности реализации интегрированных многофункциональных преобразователей пьезоэлектрических датчиков физических величин // VII Междунар. науч.-технич. конф. «Инновационные процессы пьезоэлектрического приборостроения и нанотехнологий»: сб. тр. Ростов-н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2010. С. 129–132.
9. Янчич В.В., Панич А.Е., Янчич Вл.В. Перспективы применения интегрированных многофункциональных преобразователей в пьезоэлектрических датчиках механических величин // *Инженерный вестник Дона*. 2010. № 3 (13). С. 172–174.
10. Янчич В.В., Янчич Вл.В. Преобразователи пьезоэлектрических датчиков механических величин (конструкции и пути развития). Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing. 2013. 142 с.
11. Янчич В.В., Панич А.Е. Управление характеристиками пьезоэлектрических датчиков с интегрированными многофункциональными преобразователями // Матер. V Междунар. конф. «Геоинформационные технологии и космический мониторинг». Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2012. С. 329–334.
12. Янчич Вл.В., Панич А.Е. Двухпараметровый пьезоэлектрический преобразователь // Междунар. молодежная научн. конф. «Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения»: сб. тр. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2013. С. 179–180.
13. Митько В.Н., Крамаров Ю.А., Панич А.А. Математическое моделирование физических процессов в пьезоэлектрическом приборостроении: монография. Пьезоэлектрическое приборостроение. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2009. Т. 6. 240 с.
14. Богущ М.В. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. Пьезоэлектрическое приборостроение: сб. в 3 т. Т. 3. Ростов н/Д.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2006. 346 с.
15. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. 632 с.
16. Седалищев В.Н. Пьезотрансформаторные измерительные преобразователи: монография. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2015. 167 с.
17. Sedalishchev V.N., Sergeeva I.a.S., Simulation Of Measuring Transducers Based On Interconnected Piezoresonators // X International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production (HPCST) 2020. Barnaul, 24–25 April 2020. / IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1615. Article: 012030. DOI: 10.1088/1742-6596/1615/1/012030
18. Sedalishchev V.N., Sergeeva I.a.S., Strahatov D.O. Simulation Modeling of Composite Piezotransformer Measuring Transducer with Differential Output // XI International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production (HPCST) 2021. Barnaul, 21–22 May 2021. / IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2142, Article: 012018. DOI: 10.1088/1742-6596/2142/1/012018

References

1. Sharapov V.M., Minaev I.G., SotulaZh.V. et al. *Piezoceramic Transformers and Sensors*. Cherkasy: Vertikal. 2010. 278 p. (In Russ.).
2. Nizametdinov A.M. Measurement of The Goodness of Fit and Natural Frequency of the Vibrating System of a Vibroviscosimetric Sensor. *Sensors and Systems*. 2016. No 10. P. 15–20. (In Russ.).
3. Heinisch M., Voglhuber-Brunnmaier T., Reichel E.K. et al. Reduced Order Models for Resonant Viscosity and Mass Density Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. Vol. 220. P. 76–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.09.006>
4. Hadidi S., Hassanzadeh A. A Novel Self-Powered, High-Sensitivity Piezoelectric Vibration Sensor Based on Piezoelectric Combo Effect. *IEEE Sensors Journal*. 2023. Vol. 23. No 21. P. 25797–25803. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3317445>
5. Lee C.K., Hsu Y.H., Hsiao W.H. et al. Electrical and Mechanical Field Interactions of Piezoelectric Systems: Foundation of Smart Structures-Based Piezoelectric Sensors and Ac-

tuators, And Free-Fall Sensors. *Smart Materials and Structures*. 2004. Vol. 13. No 5. P. 1090. DOI: <https://doi.org/10.1088/0964-1726/13/5/015>

6. Solomin B.A., Nizametdinov A.M., Chertoriyskiy A.A. et al. Miniature High-Sensitivity and High-Speed Vibrating Viscometric Sensor. *Sensors and Systems*. 2015. No 7. P. 35–39. (In Russ.).

7. Spletzer M., Raman A., Wu A. Q. et al. Ultrasensitive Mass Sensing Using Mode Localization in Coupled Microcantilevers. *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 88. No 25. P. 254102-1–254102-3. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2216889>

8. Yanchich V.V., Panich A.E., Yanchich V.I. On The Possibility of Realisation of Integrated Multifunctional Transducers of Piezoelectric Sensors of Physical Quantities. *Proceedings of VII International Scientific and Technical Conference “Innovative Processes of Piezoelectric Instrumentation and Nanotechnology”*. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2010. P. 129–132. (In Russ.).

9. Yanchich V.V., Panich A.E., Yanchich V.I. Prospects of Application of Integrated Multifunctional Pre-Transducers in Piezoelectric Sensors of Mechanical Quantities. *Inzenernyj Vestnik Dona*. 2010. No 3 (13). P. 172–174. (In Russ.).

10. Yanchich V.V., Yanchich V.I. *Transducers of Piezoelectric Sensors of Mechanical Quantities (Constructions and Ways of Development)*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 142 p. (In Russ.).

11. Yanchich V.V., Panich A.E. Characterisation Control of Piezoelectric Sensors with Integrated Multifunctional Transducers. *Proceedings of the V International Conference “Geoinformation Technologies and Space Monitoring”*. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012. P. 329–334. (In Russ.).

12. Yanchich V.I., Panich A.E. Two-Parameter Piezoelectric Transducer. *Proceedings of the International Youth Sci-*

entific Conference “Actual problems of Piezoelectric Instrumentation”. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2013. P. 179–180. (In Russ.).

13. Mitko V.N., Kramarov Yu.A., Panich A.A. *Mathematical Modelling of Physical Processes in Piezoelectric Instrumentation*. Piezoelectric Instrumentation. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2009. Vol. 6. 240 p. (In Russ.).

14. Bogush M.V. Piezoelectric Sensors for Extreme Operating Conditions. *Piezoelectric Instrumentation: Collection In 3 Volumes. Vol. 3*. Rostov-on-Don: Izd-vo SKNCzVSh, 2006. 346 p. (In Russ.).

15. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *Piezoelectric Sensors*. Moscow: Texnosfera, 2006. 632 p. (In Russ.).

16. Sedalishhev V.N. *Piezotransformer Measuring Transducers*. Barnaul: Izd-vo AltGU, 2015. 167 p. (In Russ.).

17. Sedalishhev V.N., Sergeeva I.A. Simulation of Measuring Transducers Based on Interconnected Piezoresonators. *X International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production (HPCST) 2020*. Barnaul, 24–25 April 2020. IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1615, Article: 012030. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1615/1/012030>

18. Sedalishhev V.N., Sergeeva I.A., Strahatov D.O. Simulation Modeling of Composite Piezotransformer Measuring Transducer with Differential Output *XI International Conference on High-Performance Computing Systems and Technologies in Scientific Research, Automation of Control and Production (HPCST) 2021*. Barnaul, 21–22 May 2021. IOP Publishing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2142, Article: 012018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2142/1/012018>

Информация об авторах

В.Н. Седалищев, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и электроники, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

Р.В. Краев, аспирант Института цифровых технологий, электроники и физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

А.В. Сеулеков, преподаватель кафедры вычислительной техники и электроники, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

С.В. Умбетов, доцент кафедры информационных систем в экономике, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия.

Information about the authors

V.N. Sedalishchev, Doctor of Sciences in Technology, Professor, Professor of the Department of Computing Techniques and Electronics, Altai State University, Barnaul, Russia;

R.V. Kraev, Postgraduate Student of the Department of Radio Physics and Theoretical Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

A.V. Seulekov, Lecturer, Department of Computing Techniques and Electronics, Altai State University, Barnaul, Russia;

S.V. Umbetov, Associate Professor of the Department of Information Systems in Economics, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia.