

Исследование влияния сегментирования на широкополосные характеристики пьезокерамического элемента

В. И. Калюта✉, В. В. Деменчук, П. П. Пивнев, С. П. Тарасов

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

✉ 9wt9@bk.ru

Аннотация. В рамках представленного исследования проведен экспериментальный анализ электрических характеристик сегментированного пьезокерамического элемента, изготовленного из материала ЦТБС-3, с номинальной резонансной частотой 80 кГц. Сегментация элемента, выполненная посредством прецизионной гравировки, заключалась в разделении базовой структуры на пять отдельных сегментов. Основная цель исследования заключалась в расширении полосы пропускания пьезоэлемента по сравнению с несегментированной конфигурацией, что представляет собой актуальную задачу в области акустоэлектроники. Были проведены измерения комплексного импеданса, активной составляющей полного сопротивления и динамической емкости как отдельных сегментов, так и различных их комбинаций, а также целого элемента в двух состояниях: в ненагруженном (без заливки) и нагруженном (после заливки компаундным материалом). Целью исследования было определение эффективности сегментации в достижении желаемой широкополосности, а также детальное изучение влияния процесса сегментации и последующей заливки на электрические параметры пьезоэлемента. Особое внимание уделено выявлению взаимосвязей и взаимного влияния между отдельными сегментами пьезоэлемента, позволяющих оценить их динамическое взаимодействие и электромеханические свойства в различных рабочих условиях. Полученные данные предназначены для разработки и оптимизации конструкции пьезоэлектрических преобразователей, предназначенных для работы в широкополосных системах, включая разработку методик управления характеристиками отдельных сегментов для достижения целевых параметров.

Ключевые слова: пьезокерамика ЦТБС-3, сегментированный пьезоэлемент, широкополосность, резонансная частота, импеданс, емкость

Для цитирования: Исследование влияния сегментирования на широкополосные характеристики пьезокерамического элемента / В. И. Калюта, В. В. Деменчук, П. П. Пивнев, С. П. Тарасов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 8. С. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-5-15.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Study of the Effect of Segmentation on the Broadband Characteristics of a Piezoceramic Element

V. I. Kalyuta✉, V. V. Demenchuk, P. P. Pivnev, S. P. Tarasov

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ 9wt9@bk.ru

Abstract. Within the framework of the presented study, an experimental analysis of the electrical characteristics of a segmented piezoceramic element made of the material CTBS-3 with a nominal resonant frequency of 80 kHz has been carried out. The segmentation of the element, performed by means of precision engraving,

consisted in dividing the basic structure into five separate segments. The main objective of the study was to extend the bandwidth of the piezo element compared to the non-segmented configuration, which is a relevant task in the field of acoustoelectronics. Measurements of the complex impedance, active component of the total resistance and dynamic capacitance of both individual segments and their various combinations, as well as of the whole element in two states were carried out: in the unloaded state (without filling) and loaded after filling with compound material. The purpose of the study was to determine the effectiveness of segmentation in achieving the desired broadband, as well as a detailed study of the influence of the segmentation process and subsequent casting on the electrical parameters of the piezo element. Particular attention was paid to the identification of interrelationships and mutual influence between the individual segments of the piezo element, allowing to evaluate their dynamic interaction and electromechanical properties under different operating conditions. The obtained data are intended for the development and optimisation of the design of piezoelectric transducers intended for operation in broadband systems, including the development of techniques for controlling the characteristics of individual segments to achieve target parameters.

Keywords: CTSB-3 piezoceramics, segmented piezoelement, broadband, resonant frequency, impedance, capacitance

For citation: Study of the Effect of Segmentation on the Broadband Characteristics of a Piezoceramic Element / V. I. Kalyuta, V. V. Demenchuk, P. P. Pivnev, S. P. Tarasov // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 8. P. 5–15. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-8-5-15.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Пьезоэлектрический эффект, открытый братьями Кюри в 1880 г., совершил революцию в инженерных технологиях, став основой для устройств, преобразующих механическую энергию в электрическую и наоборот. Эта уникальная способность, известная как прямой и обратный пьезоэлектрические эффекты, обеспечила их применение в ультразвуковой диагностике, системах активного шумоподавления, гидролокаторах, энергосборных устройствах и даже в прецизионных позиционирующих системах микроэлектромеханики (MEMS). Однако, несмотря на десятилетия исследований, ключевой проблемой пьезоэлементов остается их узкополосность – ограниченный диапазон частот, в котором они эффективно генерируют или принимают сигналы. В условиях растущих требований к многозадачности устройств, например в медицинских ультразвуковых системах, где одновременная визуализация тканей и доплеровский анализ кровотока требуют работы в разных частотных диапазонах, это ограничение становится критическим.

Традиционные подходы к расширению полосы пропускания – использование композитных структур (1–3 пьезокомпозитов) или многослойных резонаторов и т. п., сталкиваются с компромиссами между КПД, сложностью изготовления и стоимостью. Альтернативной стало сегментирование – разделение пьезоэлемента на изолированные области (сегменты) с индивидуальными резонансными свойствами. Этот метод, вдохновленный принципами фрактальных антенн и аку-

стических метаматериалов, позволяет формировать перекрывающиеся резонансы за счет механического и электрического взаимодействия сегментов. Например, в подводной акустике такие элементы могут одновременно излучать сигналы для навигации (низкие частоты) и детектировать препятствия (высокие частоты), что невозможно при использовании классических монолитных преобразователей.

Материал ЦТБС-3, выбранный для исследования, обладает высокой пьезоактивностью и стабильностью в широком температурном диапазоне, что делает его предпочтительным для критических применений. Однако его потенциал для широкополосных систем до сих пор изучен недостаточно, особенно в комбинации с методами сегментирования и компаундирования. Последнее играет двойную роль: механически стабилизирует хрупкие сегменты и модифицирует акустический импеданс, влияя на добротность резонансов.

Цель данного исследования – системно изучить, как параметры сегментирования (количество сегментов, глубина пропилов, геометрия) и свойства компаунда влияют на электрические характеристики пьезоэлемента из ЦТБС-3 с акцентом на расширение полосы пропускания. Результаты работы позволят сформулировать инженерные рекомендации для проектирования широкополосных датчиков нового поколения, сочетающих высокую чувствительность и мультичастотный режим работы. Это особенно актуально для развивающихся областей – для интернета вещей (I_0T),

где компактные пьезоустройства должны адаптироваться к разнородным акустическим средам, или для биомедицинских имплантов, требующих одновременного мониторинга нескольких физиологических параметров [1].

Основная часть. Для эксперимента использовался пьезокерамический элемент из ЦТБС-3 с резонансной частотой 80 кГц, которая соответствует толщинным колебаниям пьезокерамического элемента, определяемым его геометрическими параметрами (толщиной) и упругими свойствами материала ЦТБС-3. Для пластины толщиной h резонансная частота f_r может быть оценена по формуле

$$f_r = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{Y}{\rho}},$$

где Y – модуль Юнга материала; ρ – плотность.

Условия проведения эксперимента: частота – 80 кГц; длина – 30 мм; высота – 23 мм; толщина – 5 мм; алмазный отрезной круг; измеритель иммитанса Е7-30 УШЯИ.411218.021 РЭ; провода для подключения; компаунд для заливки «Гермакаст 2875001»; учебная лаборатория ИНГАК.

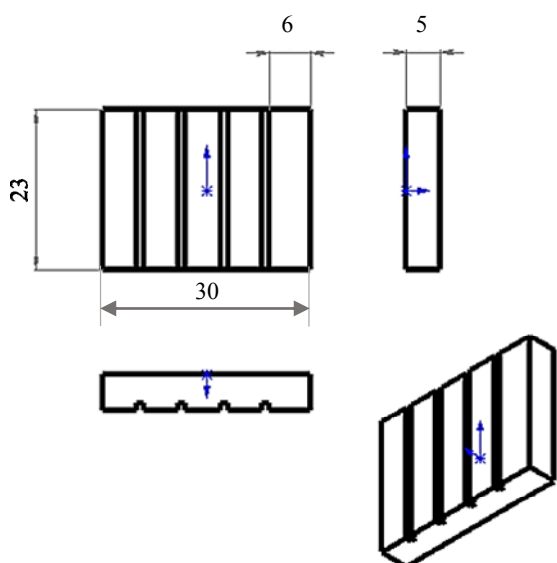


Рис. 1. Габаритный чертеж целого пьезоэлемента с сегментами

Fig. 1. Dimensional drawing of a whole piezoelectric element with segments

На пьезокерамическом элементе на излучающей поверхности (рис. 1) выполнены пять вертикальных вырезов с использованием алмазного отрезного круга. Сегментация выполнялась с использованием алмазного отрезного круга диаметром 50 мм с точностью позиционирования режущей кромки ± 0.05 мм. Ширина пропила составила 0.2 мм, глубина – 2.0 мм с допуском ± 0.1 мм.

Ширина каждого сегмента составляет 6 мм, глубина канавки – 2 мм. Под «целым элементом» понимается пьезокерамический элемент с идентичными геометрическими, структурными и электрофизическими характеристиками, не имеющих дефектов. После гравировки измерения проводились как для отдельных сегментов, так и для их комбинаций, включая замкнутую цепь (все сегменты, соединенные параллельно). Схематическое изображение элемента представлено на рис. 1.

К каждому сегменту припаивались провода для проведения измерений рис. 2.

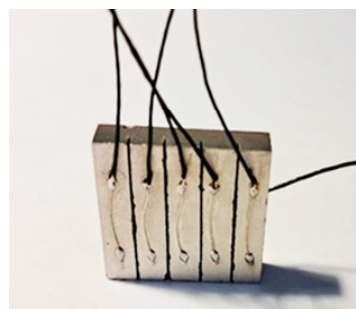


Рис. 2. Пьезоэлемент ЦТБС-3 с резонансной частотой 80 кГц
Fig. 2. Piezo element CTBS-3 with resonance frequency 80 kHz

С помощью измерителя иммитанса Е7-30 измерялись следующие параметры: активная составляющая полного сопротивления (R , Ом); импеданс (Z , Ом); динамическая емкость (C , нФ).

Измерения проводились:

- для отдельных сегментов (1–5) (рис. 3);
- групп сегментов (1–2, 1–3, 1–4) (рис. 3);
- замкнутой цепи всех сегментов (рис. 4);
- целого элемента.

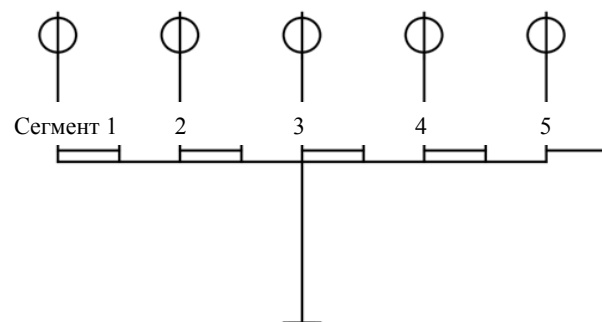


Рис. 3. Схема коммутации сегментированного элемента
Fig. 3. Switching scheme of the segmented element

Диапазон измеряемых частот: 70...90 кГц. Шаг измерения для сегментов 1 и 2 составлял 500 Гц, для сегментов 3–5, целого элемента и групп сегментов – 1 кГц.

После проведения измерений на открытом воздухе пьезоэлемент был залит компаундом и измере-

ния были повторены. Схема подключения измерителя иммитанса E7-30 к прибору приведена на рис. 4.

Результаты измерений сопротивления отдельных сегментов представлены на рис. 5 и в табл. 1.

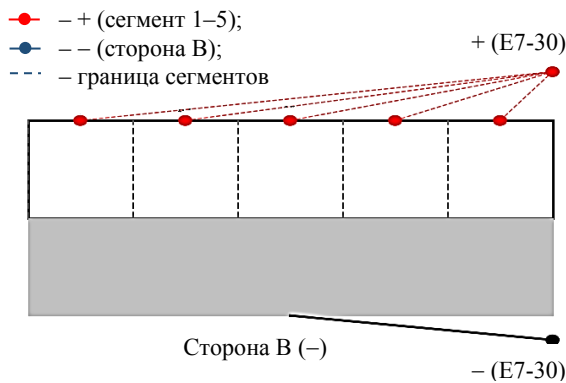


Рис. 4. Схема подключения к прибору измерителя иммитанса E7-30
Fig. 4. Wiring diagram of the E7-30 immittance meter to the device

Табл. 1. Сопротивление отдельных сегментов
Tab. 1. Resistance of individual segments

Сегмент	Резонансная частота, кГц	Сопротивление R_r , Ом
1	87.0	1785
2	86.0	225
3	78.5	1000
4	78.0	167
5	78.5	850
Целый пьезоэлемент	82.5	64

Анализ табл. 1 и рис. 4 показывает, что активные составляющие полного сопротивления отдельных сегментов и полного сопротивления целого элемента значительно различаются как по значению, так и по частоте резонанса. Целый элемент демонстрирует значительно более высокое сопротивление в диапазоне 77...78 кГц (порядка 3500 Ом), в то время как отдельные сегменты имеют меньшее сопротивление и резонансные частоты, смещенные в диапазоне 78...87 кГц. Это смещение резонансных частот является ключевым фактором, потенциально обеспечивающим расширение полосы пропускания при использовании сегментированного элемента [2]–[4].

Результаты измерений сопротивления групп сегментов и замкнутой цепи представлены на рис. 6.

Анализ рисунка демонстрирует, что сопротивление групп сегментов (1–2, 1–3, 1–4) значительно ниже, чем у целого элемента (рис. 5) в соответствующих частотных диапазонах. При этом графики сопротивления групп сегментов имеют более сложную структуру, с несколькими локальными минимумами, что свидетельствует о взаимодействии между сегментами. Сопротивление замкнутой цепи, в свою очередь, имеет промежуточное положение, что логично, поскольку представляет собой совокупность всех сегментов. Интересным моментом служит частота минимума

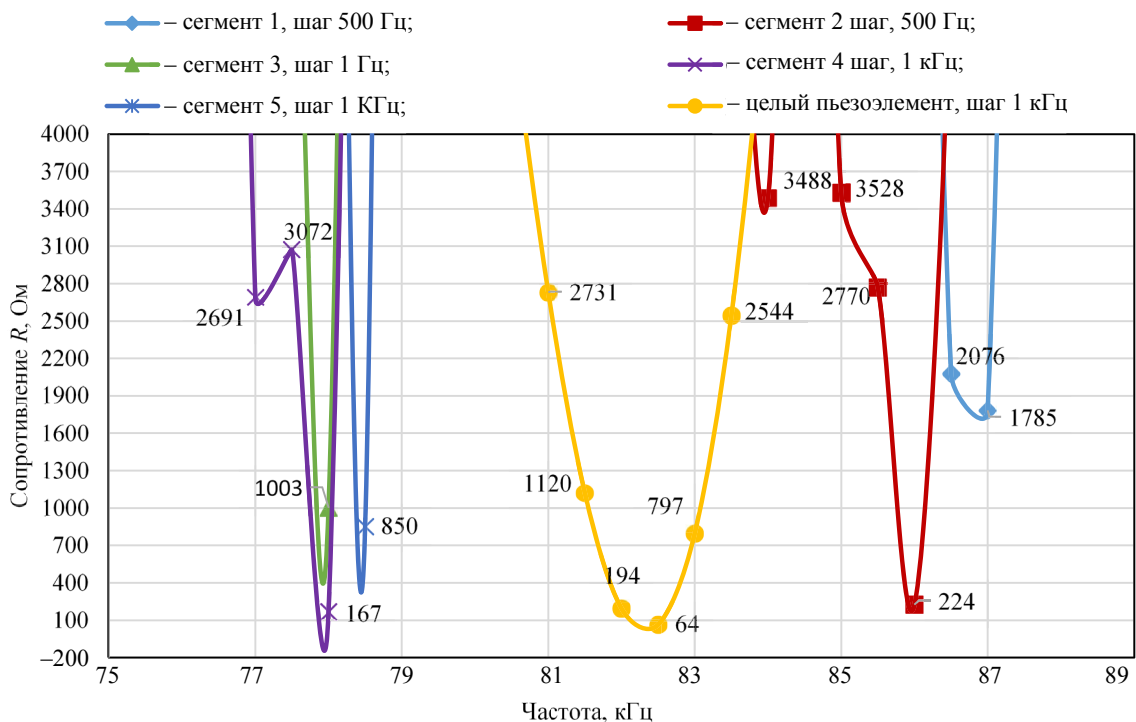


Рис. 5. Результаты измерения активной составляющей полного сопротивления в диапазоне от 70...90 кГц с 1–5 сегментами и целой керамики

Fig. 5. Resistance measurement results in the range from 70...90 kHz with 1–5 segment and whole ceramic

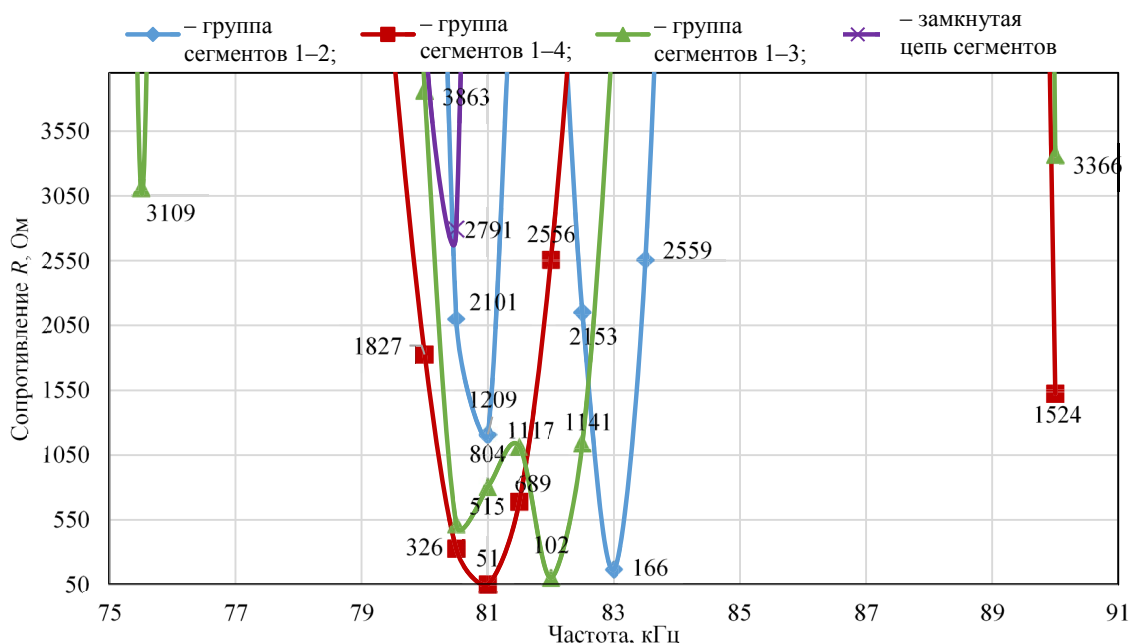


Рис. 6. Результаты измерения активной составляющей полного сопротивления нескольких групп сегментов в диапазоне от 70...90 кГц и замкнутой цепи сегментов
 Fig. 6. Measurement results of the active component of the impedance of several groups of segments in the range from 70...90 kHz and a closed circuit of segments

сопротивления замкнутой цепи, которая смещена относительно минимумов сопротивления как отдельных сегментов, так и групп сегментов, что может быть использовано для расширения полосы пропускания [4]–[6].

После измерений пьезоэлемента на воздухе и полученных результатов, далее мы заливаем наш пьезоэлемент в компаунд (рис. 7).

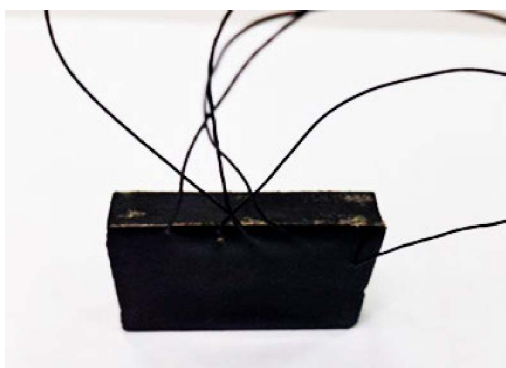


Рис. 7. Пьезоэлемент в компаунде
 Fig. 7. Piezoelectric element in the compound

Результаты измерения сопротивления отдельных сегментов и целого элемента, залитых компаундом, представлены на рис. 8.

Сравнение данных, представленных на рис. 5 и 8, позволяет оценить влияние заливки компаундом на характеристики сопротивления пьезоэлемента. После заливки сопротивление как отдельных сегментов, так и целого элемента значительно уменьшается. Кроме того, графики сопротив-

ления становятся более сглаженными, а пики резонансных частот – менее выраженными. Заливка компаундом оказывает демпфирующее воздействие на пьезоэлемент, что приводит к снижению добротности и расширению полосы пропускания. Однако это может привести и к снижению чувствительности элемента. Анализ амплитуд и частотного сдвига позволяет оценить компромисс между шириной полосы и чувствительностью [7]–[11].

Также проводилось следующее измерение группы сегментов уже залитого пьезоэлемента, на рис. 9 показаны результаты измерения сопротивления в диапазоне от 70...90 кГц групп сегментов 1–2, 1–3, 1–4, 1–5 с шагом 500 Гц.

Рис. 9 демонстрирует, что после заливки компаундом графики сопротивления групп сегментов (1–2, 1–3, 1–4, 1–5) становятся более похожими друг на друга по форме, хотя амплитуда их сопротивления по-прежнему различается. Это указывает на то, что заливка компаундом способствует более равномерному распределению механических напряжений и электрического поля между сегментами. При этом уровень сопротивления групп сегментов после заливки остается заметно ниже, чем у целого залитого элемента, что подтверждает гипотезу о возможности расширения полосы пропускания при использовании сегментированного элемента. Однако необходимо отметить, что кривые сопротивления групп сегментов все еще различаются между собой, что указывает

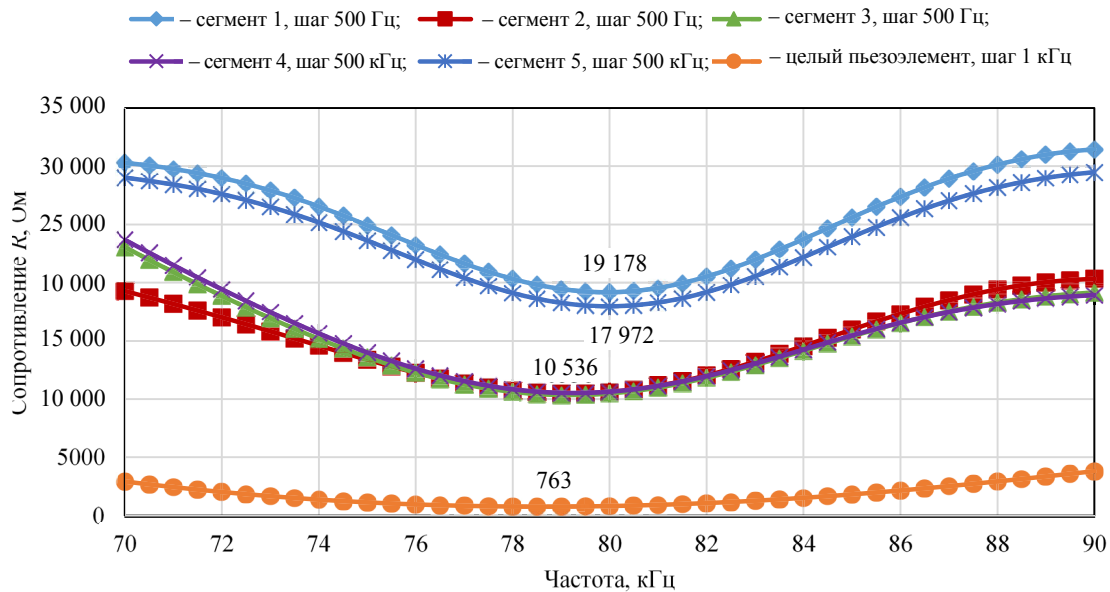


Рис. 8. Результаты измерения активной составляющей полного сопротивления в диапазоне от 70...90 кГц с 1–5 сегментами и целого пьезоэлемента
Fig. 8. Results of measuring the active component of the total resistance in the range from 70...90 kHz with 1–5 segments and the whole piezoelectric element

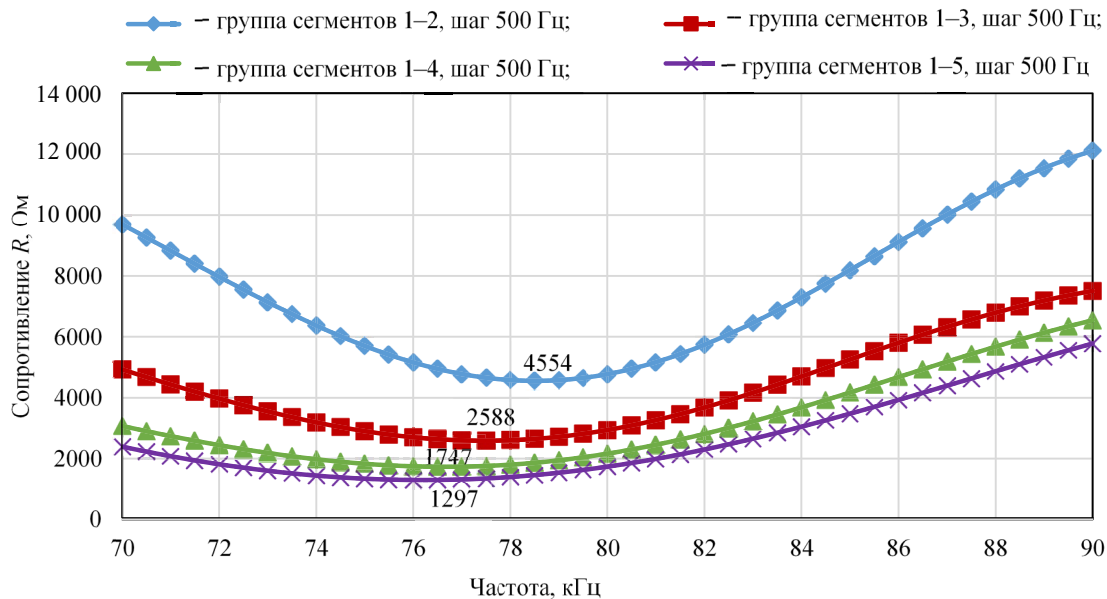


Рис. 9. Результаты измерения активной составляющей полного сопротивления в диапазоне от 70...90 кГц 1–2, 1–3, 1–4, 1–5 с шагом 500 Гц
Fig. 9. Measurement results of the active component of the total resistance in the range from 70...90 kHz 1–2, 1–3, 1–4, 1–5 in 500 Hz steps

на потенциал для дальнейшей оптимизации параметров сегментирования для достижения максимальной широкополосности [4].

Была измерена динамическая емкость пьезоэлемента как в цельном состоянии, так и при его сегментировании. Измерения проводились следующим образом.

Сначала были исследованы пять отдельных сегментов (с первого по пятый).

Все сегменты измерялись в частотном диапазоне 70...90 кГц, но с разным шагом:

Для сегментов 1 и 2 шаг составил 500 Гц, для сегментов 3, 4 и 5 – 1 кГц.

Затем было выполнено измерение целого пьезоэлемента в том же диапазоне 70...90 кГц с шагом 1 кГц.

Графики и данные, отражающие результаты этих измерений емкости, представлены на рис. 10 и в табл. 2.

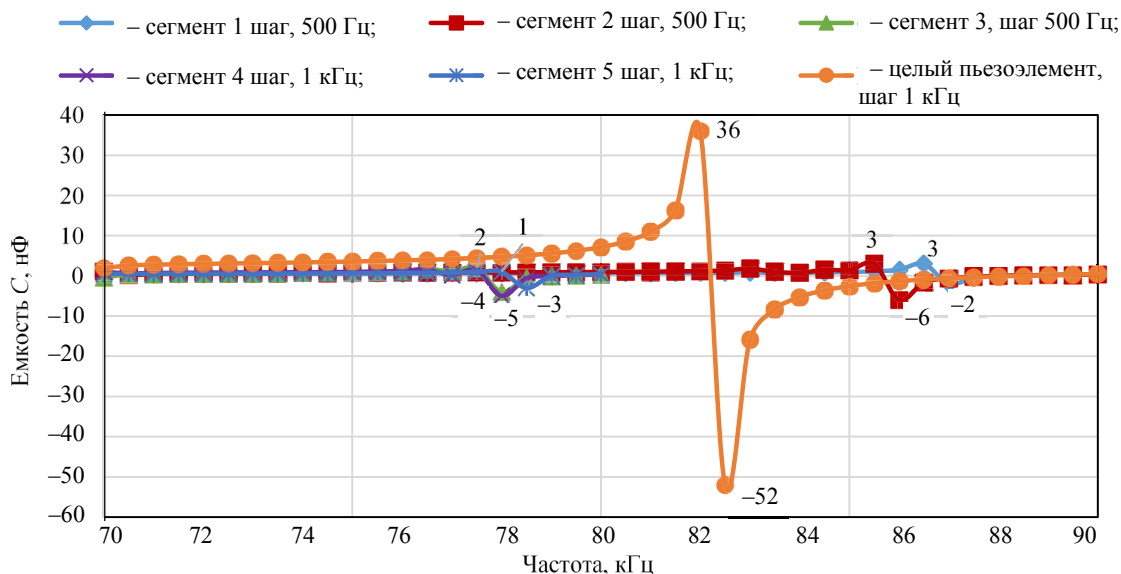


Рис. 10. Результаты измерения динамической емкости пьезоэлемента с сегментами и целого пьезоэлемента
 Fig. 10. Measurement results of the active component of the total resistance of the piezo element with segments and whole

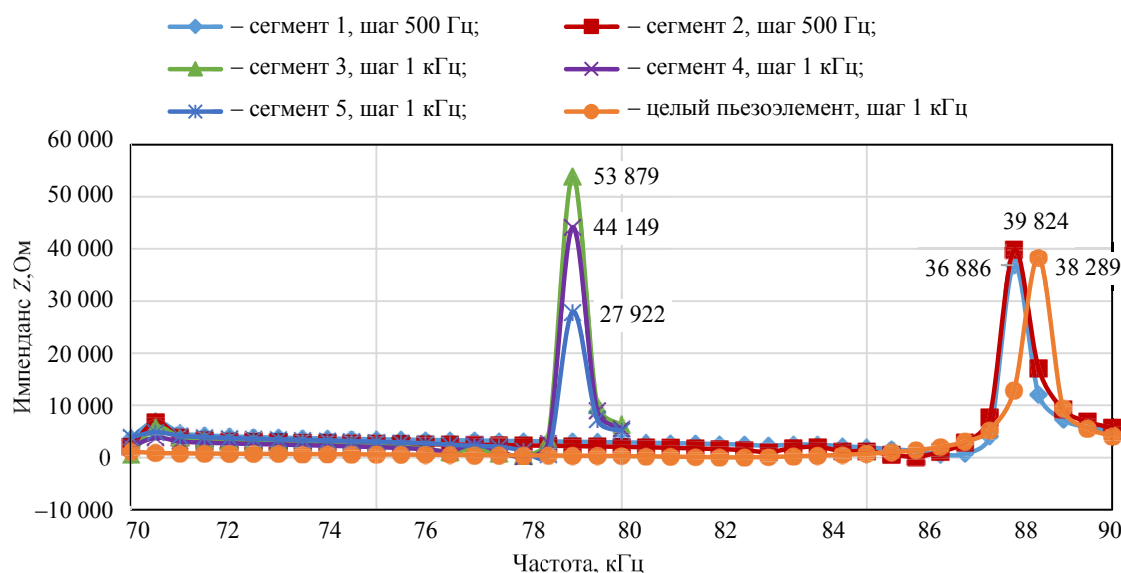


Рис. 11. Результаты измерения импеданса с сегментами и целого пьезоэлемента
 Fig. 11. Impedance measurement results with segments and whole piezo element

Табл. 2. Динамическая емкость отдельных сегментов и целого элемента
 Tab. 2. Dynamic capacity of individual segments and the entire element

Сегмент	Частота резонанса, кГц	Верхний предел емкости С, нФ	Нижний предел емкости С, нФ
1	86.5	3.10	-2.17
2	85.5	3.25	-6.31
3	77.5	2.20	-5.10
4	77.5	1.44	-5.28
5	78.0	1.34	-2.89
Целый пьезо-элемент	82.0	35.97	-52.24

Анализ данных по импедансу, представленных на рис. 11, показывает, что отдельные сегменты имеют различные значения импеданса на своих резонансных частотах. Важно отметить, что значения импеданса сегментов в целом сопоставимы с импедансом целого элемента. Однако графики импеданса имеют разные формы и ширину резонансных пиков. Более узкие пики импеданса характерны для элементов с более высокой добротностью, что обычно соответствует более узкой полосе пропускания. Таким образом, форма графиков импеданса указывает на то, что сегментирование позволяет получить элементы с раз-

личными характеристиками добротности и, соответственно, разными полосами пропускания. Сочетание этих элементов в сегментированном пьезоэлементе позволяет потенциально расширить общую полосу пропускания. Дальнейший анализ графиков, включая количественную оценку ширины полосы на уровне -3 дБ, необходим для подтверждения и оптимизации этого эффекта [6].

Сравнение целого и сегментированного элементов. *Целый элемент:*

- характеризуется одной основной резонансной частотой;
- имеет более высокую добротность (Q), что приводит к более узкой полосе пропускания;
- более прост в изготовлении и подключении;
- менее чувствителен к неоднородностям материала;
- сопротивление целого элемента демонстрирует значительно более высокое сопротивление в диапазоне $77...78$ кГц;
- графики сопротивления становятся более сглаженными, а пики резонансных частот менее выраженными.

Сегментированный элемент:

- имеет несколько резонансных частот, соответствующих каждому сегменту;
- обладает более низкой добротностью, что приводит к более широкой полосе пропускания;
- более сложен в изготовлении и требует индивидуального подключения каждого сегмента;
- чувствителен к точности сегментирования и однородности параметров сегментов;
- различия в емкости между сегментами говорят о неравномерности распределения энергии и поляризация сегментированного элемента.

Расширение полосы пропускания сегментированного элемента обусловлено следующими факторами:

- Наличие нескольких резонансных частот. Каждый сегмент имеет свою резонансную частоту, незначительно отличающуюся от остальных. В результате общая частотная характеристика элемента становится более широкой, так как перекрываются резонансные пики каждого сегмента.

- Взаимодействие между сегментами. Механическая связь между сегментами приводит к возникновению сложных колебательных мод, которые также способствуют расширению полосы пропускания.

- Уменьшение добротности. Сегментирование снижает добротность каждого сегмента, что само по себе расширяет полосу пропускания.

Анализ максимальных значений импеданса, зарегистрированных для каждого сегмента (предполагая, что указанные значения соответствуют $|Z_{\max}|$), показывает существенные различия между сегментами (рис. 11). Наибольшее значение наблюдается для сегмента 3 ($53\,879$ Ом), в то время как значения для сегментов 4 и 5 существенно ниже. Импеданс целого элемента ($38\,289$ Ом) находится в диапазоне значений, характерных для отдельных сегментов.

После анализа графиков (см. рис. 5 и 11) мы определили следующие значения:

Целый элемент (без заливки):

- резонансная частота $f_0 \approx 82.5$ кГц (из табл. 1);
- по уровню -3 дБ: $f_H = 75$ кГц, визуальная оценка по графику рис. 5 $-f_B = 89$ кГц;
- частота полосы $\Delta f = f_B - f_H = 89 - 75 = 14$ кГц.

Сегментированный элемент (без заливки), см. рис. 5. Визуально оцениваем полосу по графику – по разнице частот, где импеданс падает на 3 дБ от максимума:

$$f_H \approx 73 \text{ кГц}; f_B \approx 90 \text{ кГц};$$

$$\Delta f = 90 - 73 = 17 \text{ кГц};$$

$$\text{расширение полосы} = (\Delta f_{\text{сегм}} - \Delta f_{\text{цел}}) / \Delta f_{\text{цел}};$$

расширение полосы = $(17 - 14) / 14 \approx 0.214$ или 21.4% .

Наблюдаемый разброс резонансных частот между сегментами ($78...87$ кГц) может быть обусловлен следующими факторами:

- неоднородностью пьезоэлектрических свойств материала ЦТБС-3 вследствие технологических особенностей спекания;

- микропогрешностями при гравировке, приводящими к вариациям массы и жесткости сегментов;

- электромеханическим взаимодействием между соседними сегментами, модифицирующим их эффективные резонансные характеристики.

Обсуждение результатов. Результаты измерений показали, что сегментирование пьезоэлемента существенно влияет на его электрические характеристики. Наличие нескольких резонансных частот у разных сегментов и групп сегментов указывает на потенциальную возможность расширения полосы пропускания по сравнению с целым элементом. Частоты, при которых наблюдаются резонансы, различаются для отдельных сегментов и групп сегментов. Заливка компаундом также оказывает значительное влияние на параметры элемента, в первую очередь на его акустическую нагрузку, механические потери

(добротность Q), резонансные частоты (f_p , f_a), полное электрическое сопротивление (импеданс) и, как следствие, на эффективную полосу пропускания и электрическую добротность (Q_3), что необходимо учитывать при проектировании широкополосных устройств на основе сегментированных пьезоэлементов.

Выводы. Проведенное экспериментальное исследование позволило получить ценные данные о влиянии сегментирования и заливки компаундом на электрические характеристики пьезокерамического элемента из ЦТБС-3. Обнаружено, что наличие нескольких резонансных частот, смещенных друг относительно друга для отдельных сегментов и их комбинаций, создает потенциальную возможность расширения полосы пропускания по сравнению с целым элементом. Это особенно важно для разработки широкополосных датчиков и излучателей, способных работать в более широком диапазоне частот. Наличие множественных резонансных частот в сегментированных элементах объясняется независимой колебательной активностью каждого

сегмента, которые, взаимодействуя, формируют перекрывающиеся резонансы. Это явление аналогично принципу работы широкополосных антенн, где совмещение мод расширяет рабочий диапазон. Данное качество особенно востребовано в медицинской ультразвукографии и подводной акустике, где требуется одновременная работа на нескольких частотах для улучшения разрешения и помехоустойчивости.

Результаты также указывают на то, что правильный выбор параметров сегментирования, таких как количество сегментов, их размеры, глубина пропилов, играет решающую роль в достижении оптимальной широкополосности. При этом следует учитывать взаимодействие между сегментами, которое может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на общую частотную характеристику пьезоэлемента.

Кроме того, исследование показало, что заливка компаундом оказывает значительное влияние на характеристики сегментированного пьезоэлемента, изменяя его резонансные частоты, демпфирование и полосу пропускания.

Список литературы

1. Зайцева Н. А., Степанов Б. Г. Ультразвуковой широкополосный преобразователь с фазированным возбуждением двух образующих его пьезопластин // Дефектоскопия. № 1. 2015. С. 28–39.
2. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
3. Пестерев И. С. Система формирования импульсных сигналов для возбуждения сверхширокополосных гидроакустических преобразователей // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 8. С. 55–63.
4. Пестерев И. С., Степанов Б. Г. Электроакустические характеристики преобразователя волноводного типа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2021. № 9. С. 5–11.
5. Степанов Б. Г. Пьезоэлектрические преобразователи волноводного типа. Задачи синтеза и анализа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 196 с.
6. Давыдов Д. А., Нерук В. Ю., Пивнев П. П. Исследование импеданса широкополосного акустического пьезопреобразователя, составленного из разночастотных излучателей (краткое сообщение) // НП. 2023. Т. 33, № 4. С. 56–59. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-impedansa-shirokopolosnogo-akusticheskogo-piezopreobrazovatelya-sostavlennogo-iz-raz-](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-impedansa-shirokopolosnogo-akusticheskogo-piezopreobrazovatelya-sostavlennogo-iz-raznochastotnykh-izluchateley)

nochastotnyh-izluchateley-kratkoe (дата обращения: 05.03.2025).

7. Rong T., Wang H., Yu Zh. Research on bimetallic plate piezoelectric ceramic pillar array transducer // Appl. Acoustics. 2022. Vol. 186. P. 108455. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108455.
8. Theoretical modeling, verification, and application study on a novel bending-bending coupled piezoelectric ultrasonic transducer / L. Wang, J.-A. Wang, J.-M. Jin, Lin Yang, Shu-Wen Wu, Ch. C. Zhou // Mechan. Syst. Signal Proc. 2022. Vol. 168, no. 8. P. 108644. doi: 10.1016/j.ymsp.2021.108644.
9. Yu J., Xu L. Nonlinear equivalent circuit of high-power sandwich piezoelectric ultrasonic transducer // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. Freq. Control. IEEE, 2022. Vol. 69, no. 11. P. 3126–3136. doi: 10.1109/TUFFC.2022.3208619.
10. Pyun J. Y., Kim Y. H., Park K. K. Design of piezoelectric acoustic transducers for underwater applications // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 4. P. 1821. doi: 10.3390/s23041821.
11. Near-ideal electromechanical coupling in textured piezoelectric ceramics / Y. Yan, L. D. Geng, H. Liu, H. Leng, X. Li, Yu U. Wang, Sh. Priya // Nat. Commun. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 1–9. doi: 10.1038/s41467-022-31165-y.

Информация об авторах

Калюта Владимир Игоревич – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники, научный сотрудник. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии Южного федерального университета, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е., Таганрог, 347922, Россия.

E-mail: kalyuta@sfedu.ru

Деменчук Владимир Валерьевич – аспирант кафедры электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии Южного федерального университета, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е., Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: vdemenchuk@sfnedu.ru

Пивнев Петр Петрович – канд. техн. наук, зав. кафедрой электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии Южного федерального университета, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е., Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: pivnevpp@sfnedu.ru

Тарасов Сергей Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники. Институт нанотехнологий электроники и приборостроения Инженерно-технологической академии Южного федерального университета, ул. Шевченко, д. 2, корп. Е., Таганрог, 347922, Россия.
E-mail: sptarasov@sfnedu.ru

Вклад авторов:

Калюта В. И. – постановка задачи, разработка методики эксперимента, непосредственное проведение измерений (импеданса, активного сопротивления, динамической емкости), экспериментов с сегментированным элементом и его комбинациями в различных состояниях (нагруженном/ненагруженном), анализ первичных результатов измерений.

Деменчук В. В. – проведение экспериментов, настройка измерительного оборудования, подготовка образцов (сегментированного пьезоэлемента), нанесение электродов, заливка компаундом, интерпретация результатов, особенно взаимного влияния сегментов, подготовка графиков и диаграмм по результатам измерений, доработка текста статьи, проверка технических деталей.

Пивнев П. П. – интерпретация электрических характеристик (импеданса, емкости) с точки зрения пьезоэлектрической теории, анализ влияния сегментации и нагрузки, исследование и объяснение динамического взаимодействия между сегментами, формулировка основной цели исследования (расширение полосы пропускания) и актуальности для акустоэлектроники, помощь в анализе существующих подходов к созданию широкополосных пьезопреобразователей.

Тарасов С. П. – определение общего направления исследования, постановка фундаментальной проблемы, предложение идеи использования прецизионной гравировки для создания сегментированной структуры с целью расширения полосы пропускания, консультации по выбору материалов (ЦТСБ-3), методикам измерений, критериям оценки эффективности сегментации, глубокий анализ полученных данных, формулировка ключевых выводов о влиянии сегментации и заливки, оценка перспектив для разработки преобразователей, организация доступа к оборудованию (для гравировки, измерений), финансирование.

References

1. Zajceva N. A., Stepanov B. G. Ul'trazvukovoj shirokopolosnyj preobrazovatel' s fazirovanym vozvuzhdeniem dvuh obrazujushhij ego p'ezoplastin // Defektoskopija. № 1. 2015. S. 28–39. (In Russ.).
2. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. Osobennosti impul'snyh rezhimov raboty jelektroakusticheskij p'ezoelektricheskij preobrazovatelej. SPb.: Politehnika, 2014. 294 s. (In Russ.).
3. Pesterev I. S. Sistema formirovanija impul'snyh signalov dlja vozvuzhdenija sverhshirokopolosnyh gidroakusticheskij preobrazovatelej // Izv. SPbGETU. 2017. № 8. S. 55–63. (In Russ.).
4. Pesterev I. S., Stepanov B. G. Jelektroakusticheskie harakteristiki preobrazovatelja volnovodnogo tipa // Izv. SPbGETU. 2021. № 9. S. 5–11. (In Russ.).
5. Stepanov B. G. P'ezoelektricheskije preobrazovately volnovodnogo tipa. Zadachi sinteza i analiza. SPb.: Izd-vo SPbGETU, 2020. 196 s.
6. Davydov D. A., Neruk V. Ju., Pivnev P. P. Issledovanie impedansa shirokopolosnogo akusticheskogo p'ezopreobrazovatelja, sostavlenogo iz raznochastotnyh izluchatelej (kratkoe soobshhenie) // NP. 2023. T. 33, № 4. S. 56–59. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-impedansa-shirokopolosnogo-akusticheskogo-piezopreobrazovatelya-sostavlenogo-iz-raznochastotnyh-izluchatelej-kratkoe> (data obrashhenija: 05.03.2025). (In Russ.).
7. Rong T., Wang H., Yu Zh. Research on bimetallic plate piezoelectric ceramic pillar array transducer // Appl. Acoustics. 2022. Vol. 186. P. 108455. doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108455.
8. Theoretical modeling, verification, and application study on a novel bending-bending coupled piezoelectric ultrasonic transducer / L. Wang, J.-A. Wang, J.-M. Jin, Lin Yang, Shu-Wen Wu, Ch. C. Zhou // Mechan. Syst. Signal Proc. 2022. Vol. 168, no. 8. P. 108644. doi: 10.1016/j.ymssp.2021.108644.

9. Yu J., Xu L. Nonlinear equivalent circuit of high-power sandwich piezoelectric ultrasonic transducer // IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr. Freq. Control. IEEE, 2022. Vol. 69, no. 11. P. 3126–3136. doi: 10.1109/TUFFC.2022.3208619.

10. Pyun J. Y., Kim Y. H., Park K. K. Design of piezoelectric acoustic transducers for underwater applications

// Sensors. 2023. Vol. 23, no. 4. P. 1821. doi: 10.3390/s23041821.

11. Near-ideal electromechanical coupling in textured piezoelectric ceramics / Y. Yan, L. D. Geng, H. Liu, H. Leng, X. Li, Yu U. Wang, Sh. Priya // Nat. Commun. 2022. Vol. 13, no. 1. P. 1–9. doi.org/10.1038/s41467-022-31165-y.

Information about the authors

Vladimir I. Kalyuta – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and medical equipment, researcher. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University, Shevchenko St., 2, Bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.

E-mail: kalyuta@sfned.ru

Vladimir V. Demenchuk – postgraduate student of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University, Shevchenko St., 2, Bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.

E-mail: vdemenchuk@sfned.ru

Petr P. Pivnev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrohydroacoustic and medical equipment. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University, Shevchenko St., 2, Bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.

E-mail: pivnevpp@sfned.ru

Sergey P. Tarasov – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electrohydroacoustic and Medical Technology. Institute of Nanotechnology Electronics and Instrumentation Engineering and Technology Academy Southern Federal University, Shevchenko St., 2, Bldg. E, Taganrog, 347922, Russia.

E-mail: sptarasov@sfned.ru

Author contribution statement:

Kalyuta V. I. – was responsible for the formulation of the problem, the development of experimental methods, and the direct measurement of impedance, active resistance, and dynamic capacitance, i conducted experiments with a segmented element and its combinations in various states (loaded/unloaded). Analysis of primary measurement results.

Demenchuk V. V. – took an active part in conducting experiments and setting up measuring equipment, he was responsible for preparing samples (segmented piezoelectric element), applying electrodes, and filling with a compound, participation in the interpretation of results, especially the mutual influence of segments, preparation of graphs and diagrams based on measurement results, participation in the revision of the text of the article, verification of technical details.

Pivnev P. P. – participation in the interpretation of electrical characteristics (impedance, capacitance) from the point of view of piezoelectric theory, analysis of the effects of segmentation and load, research and explanation of the dynamic interaction between segments, participation in the formulation of the main research objective (bandwidth expansion) and relevance for acousto-electronics, assistance in the analysis of existing approaches to the creation of broadband piezoelectric converters.

Tarasov S. P. – definition of the general direction of research, statement of the fundamental problem, the idea of using precision engraving to create a segmented structure in order to expand the bandwidth, consultations on the selection of materials (CTSB-3), measurement methods, criteria for evaluating the effectiveness of segmentation, in-depth analysis of the data obtained, formulation of key conclusions about the impact of segmentation and fill, assessment of prospects for the development of converters, organization of access to equipment (for engraving, measurements), financing.

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; принята к публикации после рецензирования 05.07.2025; опубликована онлайн 30.10.2025.

Submitted 25.03.2025; accepted 05.07.2025; published online 30.10.2025.