

УДК 534.321.9;551.465;534.222

EDN: JHKKWQ

© В. И. Калюта, В. В. Деменчук, П. П. Пивнев, С. П. Тарасов, 2025

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОСТАВНЫХ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С НАКЛАДКАМИ ДЛЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ ЭКОЛОГИИ

Представлены результаты экспериментального исследования влияния количества активных пьезокерамических элементов (2, 6, 8) на электроакустические характеристики широкополосных стержневых преобразователей с накладками в частотном диапазоне 12–35 кГц. Методом экспериментального макетирования исследованы частотные зависимости активной составляющей полного сопротивления (R_w) и динамической емкости (C_d) трех конфигураций преобразователей с пьезокерамическими элементами из материала ЦТБС-3 и накладками из нержавеющей стали. Установлено, что в низкочастотном поддиапазоне (12–21 кГц) все исследованные конфигурации демонстрируют сопоставимые значения R_w (~3000 Ом), тогда как в высокочастотном поддиапазоне (22–35 кГц) наблюдаются существенные различия: двухэлементный макет показывает максимальное $R_w = 8000$ Ом при 29 кГц, а многоэлементные конфигурации (6 и 8 элементов) характеризуются значительно меньшими значениями (42–190 Ом) вследствие фазовых эффектов взаимодействия элементов. Динамическая емкость изменяется от +87 до –78 нФ в зависимости от конфигурации и частоты. Научная новизна заключается в проведении систематического сравнительного исследования зависимости ключевых электроакустических параметров от количества активных элементов в составных стержневых преобразователях с накладками для частотного диапазона, актуального для гидроакустического мониторинга морской экологии. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения двухэлементных конфигураций для высокочастотных приложений и многоэлементных — для широкополосных задач мониторинга морских экосистем.

Ключевые слова: пьезокерамические преобразователи, гидроакустика, морская экология, активное сопротивление, динамическая емкость, широкополосные преобразователи, ЦТБС-3

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования широкополосных стержневых преобразователей с накладками обусловлена возрастающими потребностями гидроакустического мониторинга морских экосистем и необходимостью повышения эффективности акустических систем для изучения влияния антропогенных факторов на морскую среду [1]. Частотный диапазон 12–35 кГц представляет особый интерес, поскольку охватывает спектральные характеристики акустической активности многих видов морских организмов, включая морских млекопитающих, и позволяет регистрировать сигналы антропогенного происхождения [2, 3].

Фундаментальные принципы проектирования гидроакустических преобразователей изложены в классических работах Г.М. Свердлина [1] и В.В. Богородского [2]. Развитие технологий пьезокерамических материалов, рассмотренное в справочнике под редакцией С.И. Пугачева [3], открыло

новые возможности для создания эффективных широкополосных систем.

Современные исследования в области подводных пьезоэлектрических преобразователей демонстрируют значительный прогресс. S. Park et al. [4] провели комплексный анализ различных конструктивных решений для подводных применений, выделив ключевые факторы, влияющие на производительность преобразователей. Y. Birjis et al. [5] исследовали новые композитные пьезокерамические материалы с улучшенными характеристиками для морских применений.

Особый интерес представляют работы по применению пьезокерамических преобразователей для экологического мониторинга. M. Godlewska и S. Ye [6] обобщили современные достижения в области применения гидроакустических методов для исследования морских, переходных и пресноводных экосистем. L. Shams et al. [7] представили новые алгоритмы обработки гидроакустических данных для мониторинга морских организмов.

Развитие технологий изготовления пористых пьезокерамик открыло новые возможности для создания широкополосных преобразователей с улучшенным акустическим согласованием с водной средой [8]. Исследования Н. Wang et al. [9] показали эффективность применения новых пьезоэлектрических материалов для высокочувствительных подводных систем детектирования.

Б.Г. Степанов [10, 11] показал перспективность использования фазированного возбуждения секций в широкополосных стержневых преобразователях, а Д.Б. Дианов с соавторами [12] разработали методы оптимизации слоистых согласующих структур. Современные подходы к оптимизации конструкции преобразователей рассмотрены в работах S. Nao et al. [13] и [14].

Однако в современной литературе недостаточно освещен вопрос влияния количества активных пьезокерамических элементов на ключевые электроакустические характеристики составных стержневых преобразователей с накладками в частотном диапазоне, актуальном для экологических приложений. Несмотря на значительные достижения в разработке новых материалов [15, 16] и методов оптимизации [17, 18], отсутствуют систематические данные о частотных зависимостях активной составляющей полного сопротивления (R_w) и динамической емкости (C_d) для различных конфигураций преобразователей в контексте их применения для мониторинга морских экосистем [19].

ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель работы — экспериментальное исследование влияния количества активных пьезокерамических элементов (2, 6, 8) на электроакустические характеристики (активную составляющую полного сопротивления R_w и динамическую емкость C_d) макетов широкополосных стержневых преобразователей с накладками в диапазоне 12–35 кГц и оценка их применимости для гидроакустического мониторинга морских экосистем.

Задачи исследования:

1. Разработать и изготовить три макета стержневых преобразователей с различным количеством пьезокерамических элементов (2, 6, 8).
2. Экспериментально определить частотные зависимости активной составляющей полного сопротивления R_w в поддиапазонах 12–21 кГц и 22–35 кГц.
3. Исследовать частотные зависимости динамической емкости C_d для всех конфигураций преобразователей.
4. Провести сравнительный анализ влияния количества активных элементов на электроакустические характеристики.

5. Оценить перспективы применения различных конфигураций преобразователей для задач экологического мониторинга морской среды.

Научная новизна заключается в проведении первого систематического сравнительного экспериментального исследования зависимостей активной составляющей полного сопротивления и динамической емкости от количества активных элементов (2, 6, 8) в составных стержневых преобразователях с накладками для частотного диапазона 12–35 кГц, актуального для задач гидроакустического мониторинга морской экологии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Конструкция экспериментальных макетов

Для исследования были изготовлены три макета широкополосных стержневых преобразователей, различающихся количеством активных пьезокерамических элементов: макет № 2 (2 элемента), макет № 6 (6 элементов) и макет № 8 (8 элементов). Общий вид макетов дан в Приложении на рис. П, эскизы макетов представлены на рис. 1.

Материалы конструкции

Активные элементы: пьезокерамика ЦТБС-3 (цирконат–титанат бария–стронция), характеризующаяся высокой пьезоэлектрической активностью ($d_{33} \approx 350\text{--}400$ пКл/Н) и механической прочностью.

Накладки: нержавеющая сталь марки 12Х18Н10Т (обеспечивает коррозионную стойкость в морской среде) и алюминий марки АМг6 (для снижения массы конструкции).

Крепежные элементы: болты М8 класса прочности 8.8.

Геометрические параметры

Все макеты имели стандартизированную геометрию с общей длиной L и диаметром D , обеспечивающими резонанс в исследуемом частотном диапазоне. Накладки фиксировались болтовым соединением с контролируемым усилием затяжки для обеспечения акустического контакта.

Экспериментальная установка и методика измерений

Измерения электроакустических характеристик проводились с использованием автоматизированной установки на базе измерителя иммитанса Е7-30 (производства ОАО "МНИПИ", Республика Беларусь) с рабочим частотным диапазоном от 25 Гц до 1 МГц и основной погрешностью измерения модуля полного сопротивления $\pm(0.7\text{--}1.5)\%$ в зависимости от частоты.

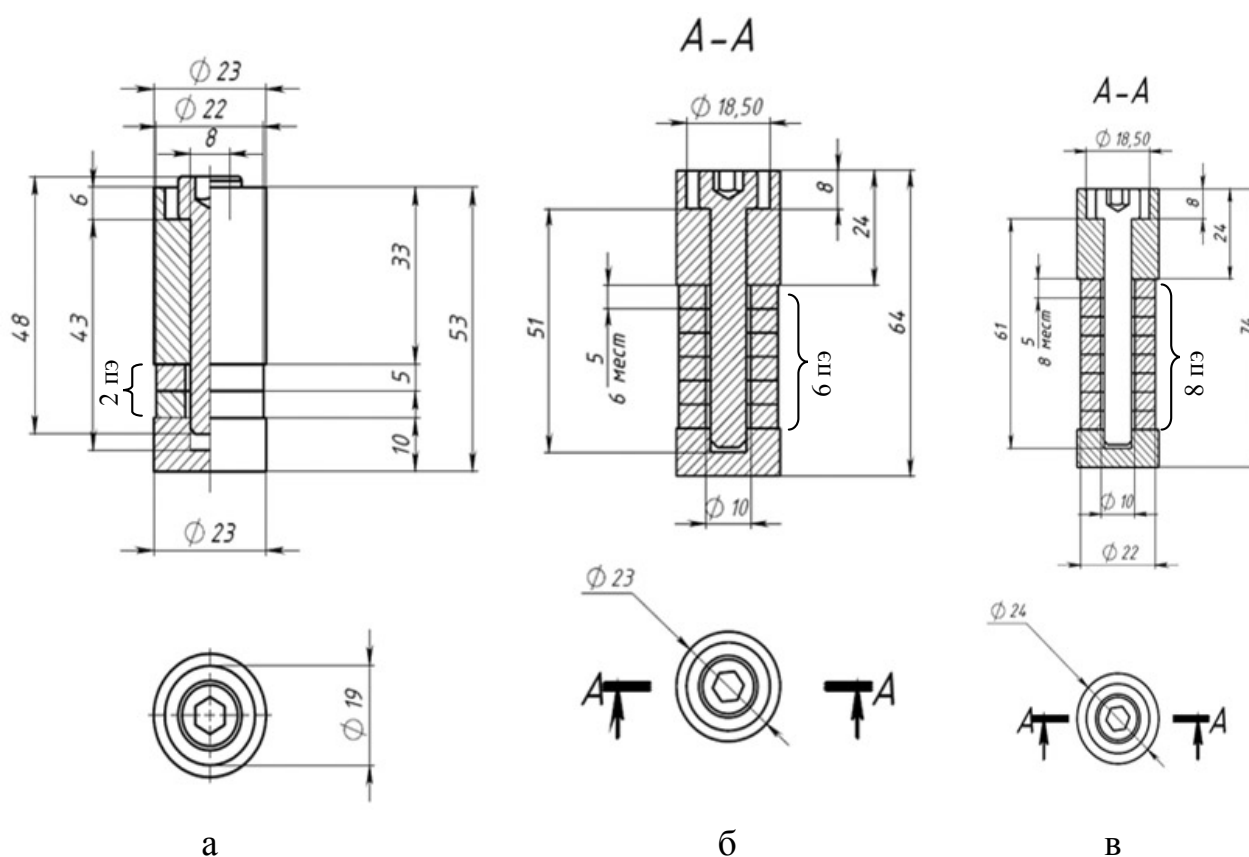


Рис. 1. Эскизы макетов.

а — макет № 2 (с 2 пьезоэлементами); б — макет № 6 (с 6 пьезоэлементами); в — макет № 8 (с 8 пьезоэлементами); обозначение: пэ — пьезоэлемент

Условия измерений

Среда: воздух при нормальных условиях ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, относительная влажность 45–65%).

Амплитуда измерительного сигнала: 1 В (среднеквадратичное значение).

Частотный шаг: 100 Гц в диапазоне 12–21 кГц, 200 Гц в диапазоне 22–35 кГц.

Режим измерения: последовательная схема зашунтирования (R_s-L_s , R_s-C_s).

Время установления сигнала: 3 периода измерительной частоты.

Протокол измерений

1. Калибровка измерителя иммитанса Е7-30 с использованием встроенных эталонных цепей (разомкнутая цепь, короткое замыкание, эталонная нагрузка 50 Ом).

2. Установка макета преобразователя в специализированном измерительном стенде с экранированием от внешних электромагнитных помех.

3. Подключение макета к измерительным выводам прибора через коаксиальный кабель RG-58 длиной 1 м.

4. Автоматическая развертка по частоте с шагом, указанным выше, и регистрация параметров R_s (активное сопротивление) и X_s (реактивное сопротивление).

5. Вычисление динамической емкости C_d по формуле: $C_d = -1 / (2\pi F X_s)$ для емкостного характера нагрузки.

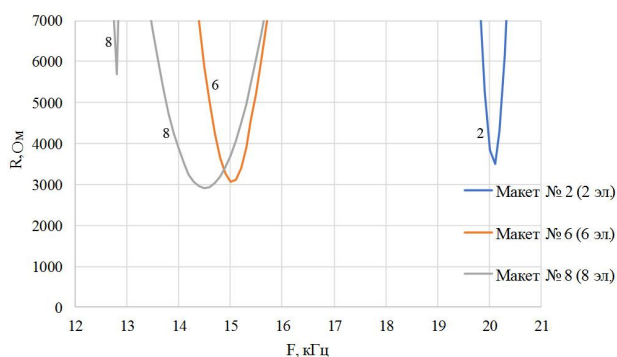
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления

Экспериментальные данные частотной зависимости активной составляющей полного сопротивления R_w для исследованных макетов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Активная составляющая полного сопротивления преобразователей

Диапазон (кГц)	№ макета	Количество элементов	R_w (Ом)	Частота F (кГц)
12–21	2	2	3506	20.1
	6	6	3068	15.0
	8	8	2915	14.5
22–35	2	2	8000	29.0
	6	6	190	30.6
	8	8	42	25.4

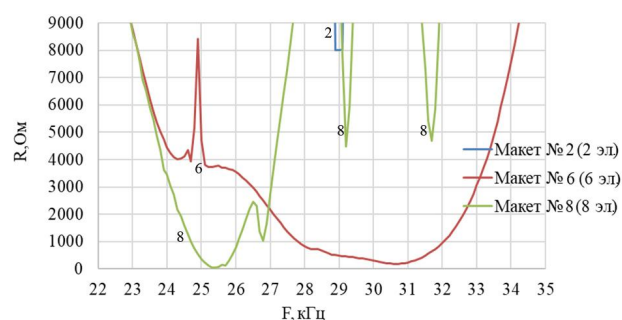
**Рис. 2.** Частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления преобразователей, сравнение всех измерений на частотах 12–21 кГц.**Анализ результатов в поддиапазоне 12–21 кГц**

В низкочастотном поддиапазоне все исследованные конфигурации демонстрируют сопоставимые значения R_w в диапазоне 2915–3506 Ом (см. рис. 2), что свидетельствует о высокой эффективности преобразования электрической энергии в акустическую для всех типов макетов. Относительно небольшие различия ($\pm 10\%$) могут быть объяснены вариациями резонансных частот, обусловленными технологическими допусками при изготовлении.

Анализ результатов в поддиапазоне 22–35 кГц

В высокочастотном поддиапазоне наблюдается кардинальное различие в поведении преобразователей:

1. Двухэлементный макет (№ 2) показывает максимальное значение $R_w = 8000$ Ом на частоте 29 кГц (см. рис. 3), что в 2.3 раза превышает значения в низкочастотном диапазоне. Это указывает

**Рис. 3.** Частотная зависимость активной составляющей полного сопротивления преобразователей, сравнение всех измерений на частотах 22–35 кГц.

на наличие высокодобротного резонанса, обусловленного согласованным колебанием двух элементов в фазе.

2. Многоэлементные макеты (№ 6 и № 8) характеризуются резким снижением R_w до значений 190 Ом и 42 Ом соответственно. Данный эффект объясняется деструктивной интерференцией акустических волн от различных элементов, приводящей к фазовым рассогласованиям и снижению общей эффективности излучения.

Физический механизм наблюдаемых различий связан с тем, что при увеличении частоты длина акустической волны в пьезокерамике становится сопоставимой с размерами отдельных элементов, что приводит к возникновению сложной картины стоячих волн и фазовых сдвигов между элементами. Аналогичные эффекты наблюдались в работах [15] для композитных стержневых преобразователей и [13] для многоэлементных систем.

Табл. 2. Динамическая емкость преобразователей

№ макета	Количество элементов	C_d (нФ)	Частота F (кГц)
2	2	от 5 до 0	20.5
6	6	от 10 до -10	30.5
8	8	от 87 до -78	25.5

Частотная зависимость динамической емкости

Результаты измерений динамической емкости C_d представлены в табл. 2.

Анализ динамической емкости

1. Увеличение абсолютных значений C_d с ростом количества элементов (2→6→8) обусловлено возрастанием общей активной площади пьезокерамики и соответствующим увеличением электрической емкости системы.

2. Изменение знака динамической емкости в высокочастотном диапазоне указывает на переход через резонанс, при котором реактивное сопротивление системы меняет характер с емкостного на индуктивный.

3. Наибольший диапазон изменения C_d для восьмизаэлементного макета (от +87 до -78 нФ) свидетельствует о более сложной резонансной структуре многоэлементной системы.

Оценка применимости для экологического мониторинга

Для низкочастотных приложений (12–21 кГц)

Регистрация крупных морских млекопитающих (киты, дельфины) — все конфигурации показывают сопоставимую эффективность. Рекомендуется использование двухэлементных макетов как наиболее простых в изготовлении.

Для высокочастотных приложений (22–35 кГц)

Детектирование мелких морских организмов, эхолокационных сигналов двухэлементные макеты обеспечивают максимальную чувствительность за счет высокого R_w . Многоэлементные конфигурации предпочтительны для широкополосных измерений.

Практическая значимость результатов

Полученные данные позволяют осуществлять обоснованный выбор конфигурации преобразователя в зависимости от специфики решаемых задач мониторинга морской экологии, что способствует повышению эффективности гидроакустических систем и качества экологических исследований. Результаты согласуются с современными тенден-

циями в области разработки специализированных преобразователей для экологических применений [19] и могут быть использованы при проектировании систем мониторинга морских экосистем нового поколения [7, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлено, что в частотном диапазоне 12–21 кГц все исследованные конфигурации преобразователей (2, 6, 8 элементов) демонстрируют сопоставимые значения активной составляющей полного сопротивления (2915–3506 Ом), что обеспечивает их высокую эффективность для низкочастотных приложений мониторинга морской экологии.

2. В высокочастотном диапазоне 22–35 кГц выявлены существенные различия электроакустических характеристик: двухэлементный макет показывает максимальное $R_w = 8000$ Ом, тогда как многоэлементные конфигурации характеризуются значительно меньшими значениями (42–190 Ом) вследствие фазовых эффектов взаимодействия элементов.

3. Динамическая емкость преобразователей изменяется в широком диапазоне (от +87 до -78 нФ) в зависимости от количества элементов и частоты, при этом наблюдается изменение знака емкости в области резонанса, что указывает на сложную резонансную структуру многоэлементных систем.

4. Установлено, что двухэлементные конфигурации наиболее эффективны для высокочастотных приложений детектирования мелких морских организмов, а многоэлементные преобразователи предпочтительны для широкополосных задач мониторинга морских экосистем.

5. Научная значимость работы заключается в получении новых экспериментальных данных о зависимости ключевых электроакустических параметров от конфигурации составных стержневых преобразователей, что расширяет теоретическую базу проектирования гидроакустических систем для экологических исследований.

6. Практическая ценность результатов состоит в возможности обоснованного выбора оптимальной конфигурации преобразователей для конкрет-

ных задач гидроакустического мониторинга морской среды, что способствует повышению эффективности экологических исследований и систем контроля антропогенного воздействия на океаны.

Перспективы дальнейших исследований включают оптимизацию геометрических параметров

накладок, проведение натурных испытаний в морских условиях, исследование влияния температуры и давления на электроакустические характеристики, а также разработку адаптивных алгоритмов обработки сигналов для различных конфигураций преобразователей.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. II. Вид макетов: макет № 2 (а), макет № 6 (б), макет № 8 (в) .

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Свердлин Г.М.* Гидроакустические преобразователи и антенны. Ленинград: Судостроение, 1988. 200 с.
2. Подводные электроакустические преобразователи: справочник / Под ред. В.В. Богородского. Ленинград: Судостроение, 1983. 248 с.
3. Пьезокерамические преобразователи: справочник / Под ред. С.И. Пугачева. Ленинград: Судостроение, 1984. 256 с.
4. *Park S. et al.* Design of Piezoelectric Acoustic Transducers for Underwater Applications // *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 4. Id. 1821. DOI: 10.3390/s23041821
5. *Birjis Y., Swaminathan S., Nazemi H., Raj G.C.A., Muni-rathinam P., Abu-Libdeh A., Emadi A.* Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs): Performance Metrics, Advancements, and Applications // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 23. Id. 9151. DOI: 10.3390/s22239151
6. *Godlewska M., Ye S.* Hydroacoustics in Marine, Transitional and Freshwaters // *Water*. 2023. Vol. 15, no. 9. Id. 1674. DOI: 10.3390/w15091674
7. *Shams L., Xu T.-B.* Underwater communication acoustic transducers: a technology review // *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 12486. Id. 124860A. DOI: 10.1117/12.2663073
8. *Rymansaib Z., Kurt P., Zhang Y., Roscow J.I., Bowen C.R., Hunter A.J.* Ultrasonic Transducers Made From Freeze-Cast Porous Piezoceramics // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2022. Vol. 69, no. 3. P. 1100–1111. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3144521
9. *Su J., Wang H., Wei T.* Hydroacoustic Performance Analysis and Testing of a Novel Piezoelectric Material Transducer // *Measurement*. 2024. Vol. 224. Id. 113817. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113817
10. *Степанов Б.Г.* О возможности построения широкополосных стержневых пьезопреобразователей с фазированным возбуждением секций // *Акустический журнал*. 2009. Т. 55, № 3. С. 407–414. URL: http://www.akzh.ru/pdf/2009_3_407-414.pdf
11. *Степанов Б.Г.* Широкополосный стержневой гидроакустический преобразователь. Пат. РФ RU 119552 U1 Российская Федерация, опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23. URL: <https://patents.google.com/patent/RU119552U1/ru>
12. *Дианов Д.Б., Задириенко И.М.* Расчет слоистой согласующей структуры стержневого преобразователя методом оптимизации параметров // *Акустический журнал*. 1981. Т. 27, № 1. С. 104–109. URL: http://www.akzh.ru/pdf/1981_1_104-109.pdf
13. *Hao S., Zhong C., Wang L., Qin L.* High-Performance Flexible Hydroacoustic Transducer Based on 1-3 PZT-5A/Silicone Rubber Composite // *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 7. Id. 2081. DOI: 10.3390/s24072081
14. *Nie X., Wang B., Tao S.* Frequency reversal-based inter-carrier interference mitigation for underwater acoustic

- OFDM communications // *Applied Acoustics*. 2022. Vol. 194. Id. 108791. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108791
15. *Liu F., Shen T., Luo Z., Zhao D., Guo S.* Underwater target recognition using convolutional recurrent neural networks with 3-D Mel-spectrogram and data augmentation // *Applied Acoustics*. 2021. Vol. 178. Id. 107989. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.107989
16. *Thompson S.C., Meyer R.J., Markley D.C.* Performance of tonpilz transducers with segmented piezoelectric stacks using materials with high electromechanical coupling coefficient // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2014. Vol. 135, no. 1. P. 155–164. DOI: 10.1121/1.4837217
17. *Egerton J.P., Johnson A.F., Turner J., Le Vay L., Mascareñas-Osorio I., Aburto-Oropeza O.* Hydroacoustics as a tool to examine the effects of Marine Protected Areas and habitat type on marine fish communities // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. Id. 47. DOI: 10.1038/s41598-017-18353-3
18. *Lin T.H., Sinniger F., Harii S., Akamatsu T.* Using Soundscapes to Assess Changes in Coral Reef Social-Ecological Systems // *Oceanography*. 2023. Vol. 36, no. 1. P. 20–27. DOI: 10.5670/oceanog.2023.s1.7
19. *Minello M., Calado L., Xavier F.C.* Ecoacoustic indices in marine ecosystems: a review on recent developments, challenges, and future directions // *ICES Journal of Marine Science*. 2021. Vol. 78, no. 9. P. 3066–3074. DOI: 10.1093/icesjms/fsab193

Южный федеральный университет, г. Таганрог

Контакты: *Калюта Владимир Игоревич*,
9wt9@bk.ru

Материал поступил в редакцию 21.08.2025

RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH INTO THE ELECTROACOUSTIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE PIEZOCERAMIC TRANSDUCERS WITH OVERLAYS FOR MARINE ECOLOGY MONITORING TASKS

V. I. Kaliuta, V. V. Demenchuk, P. P. Pivnev, S. P. Tarasov

Southern Federal University, Taganrog, Russia

The results of an experimental study of the effect of the number of active piezoceramic elements (2, 6, 8) on the electroacoustic characteristics of broadband rod transducers with overlays in the frequency range of 12–35 kHz are presented. The frequency dependences of the active component of impedance (R_w) and dynamic capacitance (C_d) of three configurations of converters with piezoceramic elements made of CTBS-3 material have been studied by experimental prototyping and stainless-steel overlays. It was found that in the low-frequency subband (12–21 kHz), all the studied configurations demonstrate comparable values of R_w (~3000 Ω), whereas in the high-frequency subband (22–35 kHz), significant differences are observed: the two-element layout shows a maximum $R_w = 8000 \Omega$ at 29 kHz, and the multi-element configurations (6 and 8 elements) are characterized by significantly lower values (42–190 Ω) due to the phase effects of the interaction of the elements. The dynamic capacitance varies from +87 to –78 nF depending on the configuration and frequency. The scientific novelty consists in conducting a systematic comparative study of the dependence of key electroacoustic parameters on the number of active elements in composite rod transducers with overlays for the frequency range relevant for hydroacoustic marine ecology monitoring. The results obtained demonstrate the prospects of using two–element configurations for high-frequency applications and multi-element configurations for broadband monitoring of marine ecosystems.

Keywords: piezoceramic transducers, hydroacoustics, marine ecology, active resistance, dynamic capacitance, broadband transducers, CTBS-3

REFERENCES

1. Sverdlin G.M. *Gidroakusticheskie preobrazovateli i antenny* [Hydroacoustic transducers and antennas]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988. 200 p. (In Russ.).
2. Bogorodskii V.V., ed. *Podvodnye ehlektroakusticheskie preobrazovateli: spravochnik* [Underwater electroacoustic transducers: a reference guide]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 248 p. (In Russ.).
3. Pugachev S.I., ed. *P'ezokeramicheskie preobrazovateli: spravochnik* [Piezoceramic transducers: a reference guide]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1984. 256 p. (In Russ.).
4. Park S. et al. Design of Piezoelectric Acoustic Transducers for Underwater Applications. *Sensors*, 2023, vol. 23, no. 4, id. 1821. DOI: 10.3390/s23041821
5. Birjis Y., Swaminathan S., Nazemi H., Raj G.C.A., Muni-rathinam P., Abu-Libdeh A., Emadi A. Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers (PMUTs): Performance Metrics, Advancements, and Applications. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 23, id. 9151. DOI: 10.3390/s22239151
6. Godlewska M., Ye S. Hydroacoustics in Marine, Transitional and Freshwaters. *Water*, 2023, vol. 15, no. 9, id. 1674. DOI: 10.3390/w15091674
7. Shams L., Xu T.-B. Underwater communication acoustic transducers: a technology review. *Proceedings of SPIE*, 2023, vol. 12486, id. 124860A. DOI: 10.1117/12.2663073
8. Rymansaib Z., Kurt P., Zhang Y., Roscow J.I., Bowen C.R., Hunter A.J. Ultrasonic Transducers Made From Freeze-Cast Porous Piezoceramics. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, vol. 69, no. 3, pp. 1100–1111. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3144521
9. Su J., Wang H., Wei T. Hydroacoustic Performance Analysis and Testing of a Novel Piezoelectric Material Transducer. *Measurement*, 2024, vol. 224, id. 113817. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113817
10. Stepanov B.G. [On the possibility of the formation of wideband rod piezo-transducers with phase generation of sections]. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustical Physics], 2009, vol. 55, no. 3, pp. 407–414. (In Russ.). URL: http://www.akzh.ru/pdf/2009_3_407-414.pdf
11. Stepanov B.G. *Shirokopolosnyi sterzhnevoy gidroakusticheskii preobrazovatel'. Patent RF no. RU119552 U1* [Broadband rod hydroacoustic converter]. Prioritet 20.08.2012. (In Russ.). URL: <https://patents.google.com/patent/RU119552U1/ru>
12. Dianov D.B., Zadirienko I.M. [Calculation of the layered matching structure of a rod transducer by the parameter optimization method]. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustical Physics], 1981, vol. 27, no. 1, pp. 104–109. (In Russ.). URL: http://www.akzh.ru/pdf/1981_1_104-109.pdf
13. Hao S., Zhong C., Wang L., Qin L. High-Performance

- Flexible Hydroacoustic Transducer Based on 1-3 PZT-5A/Silicone Rubber Composite. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 7, id. 2081. DOI: 10.3390/s24072081
14. Nie X., Wang B., Tao S. Frequency reversal-based inter-carrier interference mitigation for underwater acoustic OFDM communications. *Applied Acoustics*, 2022, vol. 194, id. 108791. DOI: 10.1016/j.apacoust.2022.108791
15. Liu F., Shen T., Luo Z., Zhao D., Guo S. Underwater target recognition using convolutional recurrent neural networks with 3-D Mel-spectrogram and data augmentation. *Applied Acoustics*, 2021, vol. 178, id. 107989. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.107989
16. Thompson S.C., Meyer R.J., Markley D.C. Performance of tonpilz transducers with segmented piezoelectric stacks using materials with high electromechanical coupling coefficient. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, vol. 135, no. 1, pp. 155–164. DOI: 10.1121/1.4837217
17. Egerton J.P., Johnson A.F., Turner J., Le Vay L., Mascareñas-Osorio I., Aburto-Oropeza O. Hydroacoustics as a tool to examine the effects of Marine Protected Areas and habitat type on marine fish communities. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, id. 47. DOI: 10.1038/s41598-017-18353-3
18. Lin T.H., Sinniger F., Harii S., Akamatsu T. Using Soundscapes to Assess Changes in Coral Reef Social-Ecological Systems. *Oceanography*, 2023, vol. 36, no. 1, pp. 20–27. DOI: 10.5670/oceanog.2023.s1.7
19. Minello M., Calado L., Xavier F.C. Ecoacoustic indices in marine ecosystems: a review on recent developments, challenges, and future directions. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, vol. 78, no. 9, pp. 3066–3074. DOI: 10.1093/icesjms/fsab193

Contacts: Kaliuta Vladimir Igorevich,
9wt9@bk.ru

Article received by the editorial office on 21.08.2025

INTRODUCTION

The relevance of research into broadband rod transducers with overlays is driven by the growing needs of hydroacoustic monitoring of marine ecosystems and the need to improve the efficiency of acoustic systems for studying the impact of anthropogenic factors on the marine environment [1]. The frequency range of 12–35 kHz is of particular interest, as it covers the spectral characteristics of the acoustic activity of many species of marine organisms, including marine mammals, and enables the recording of signals of anthropogenic origin [2, 3].

The fundamental principles of hydroacoustic transducer design are outlined in the classic works of G.M. Sverdlin [1] and V.V. Bogorodsky [2]. The development of piezoceramic material technologies, discussed in the handbook edited by S.I. Pugachev [3], has opened up new possibilities for the creation of effective broadband systems.

Modern research in the field of underwater piezoelectric transducers has demonstrated significant progress. S. Park et al. [4] conducted a comprehensive analysis of various design solutions for underwater applications, identifying key factors influencing transducer performance. Y. Birjis et al. [5] investigated new composite piezoceramic materials with improved characteristics for marine applications.

Of particular interest are studies on the use of piezoceramic transducers for environmental monitoring. M. Godlewska and S. Ye [6] summarized modern achievements in the application of hydroacoustic methods to the study of marine, transitional, and freshwater ecosystems. L. Shams et al. [7] presented new algorithms for processing hydroacoustic data for monitoring marine organisms. Developments in porous piezoceramic manufacturing technologies have opened up new possibilities for creating broadband transducers with improved acoustic matching to the aquatic environment [8]. Research by H. Wang et al. [9] demonstrated the effectiveness of using new piezoelectric materials for highly sensitive underwater detection systems.

B.G. Stepanov [10, 11] demonstrated the potential of using phased excitation of sections in broadband rod transducers, and D.B. Dianov et al. [12] developed methods for optimizing layered matching structures. Modern approaches to optimizing transducer design are discussed in the works of S. Hao et al. [13] and [14].

However, the influence of the number of active piezoceramic elements on the key electroacoustic characteristics of composite rod transducers with overlays in the frequency range relevant for environmental applications is insufficiently addressed in the modern literature. Despite significant advances in the development of new materials [15, 16] and optimization

methods [17, 18], there are no systematic data on the frequency dependences of the active component of the impedance (R_w) and dynamic capacitance (C_d) for various transducer configurations in the context of their application in monitoring marine ecosystems [19].

RESEARCH OBJECTIVES

The goal of this study is to experimentally investigate the effect of the number of active piezoceramic elements (2, 6, 8) on the electroacoustic characteristics (the active component of the impedance R_w and the dynamic capacitance C_d) of broadband rod transducer prototypes with overlays in the 12–35 kHz range and to evaluate their applicability for hydroacoustic monitoring of marine ecosystems.

Research objectives:

1. To design and manufacture three rod transducer prototypes with different numbers of piezoceramic elements (2, 6, 8).
2. To experimentally determine the frequency dependences of the active component of the impedance R_w in the 12–21 kHz and 22–35 kHz subranges.
3. To study the frequency dependences of the dynamic capacitance C_d for all transducer configurations.
4. To conduct a comparative analysis of the effect of the number of active elements on electroacoustic characteristics.
5. To assess the potential for using various transducer configurations for marine environmental monitoring.

The scientific novelty lies in conducting the first systematic comparative experimental study of the dependence of the active component of the impedance and dynamic capacitance on the number of active elements (2, 6, 8) in composite rod transducers with overlays for the frequency range of 12–35 kHz, which is relevant for hydroacoustic monitoring of marine ecology.

MATERIALS AND METHODS

Design of experimental prototypes

Three prototypes of broadband rod transducers differing in the number of active piezoceramic elements were manufactured for the study: prototype № 2 (2 elements), prototype № 6 (6 elements), and prototype № 8 (8 elements). The appearance of the layouts is given in the Appendix in Fig. II, diagrams are presented in Fig. 1.

Structural materials

Active elements: CTBS-3 piezoceramic (barium strontium zirconate titanate), characterized by high

Fig. 1. Layout diagrams.

a — Prototype No. 2 (with 2 piezoelectric elements);
б — Prototype No. 6 (with 6 piezoelectric elements);
в — Prototype No. 8 (with 8 piezoelectric elements);
designation: ПЭ — piezoelectric element

piezoelectric activity ($d_{33} \approx 350\text{--}400$ pC/N) and mechanical strength.

Overlays: "12X18H10T" stainless steel (ensures corrosion resistance in marine environments) and "AMr6" aluminum (to reduce weight).

Fasteners: M8 bolts, strength class 8.8.

Geometric parameters

All prototypes had a standardized geometry with an overall length L and diameter D , ensuring resonance in the studied frequency range. The bolts with controlled tightening torque to ensure acoustic contact secured the overlays.

Experimental setup and measurement methodology

Electroacoustic characteristics were measured using an automated setup based on an E7-30 immittance meter (manufactured by JSC MNIPI, Republic of Belarus) with an operating frequency range from 25 Hz to 1 MHz and an impedance modulus basic measurement error of $\pm(0.7\text{--}1.5)\%$ depending on frequency.

Measurement conditions

Mediment: air under normal conditions ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, relative humidity 45–65%).

Measurement signal amplitude: 1 V (root mean square).

Frequency step: 100 Hz in the range 12–21 kHz, 200 Hz in the range 22–35 kHz;

Measurement mode: series equivalent circuit ($R_s\text{--}L_s, R_s\text{--}C_s$).

Signal settling time: 3 periods of the measurement frequency.

Measurement protocol

1. Calibration of the E7-30 immittance meter using the built-in reference circuits (open circuit, short circuit, 50 Ω reference load).

2. Installation of the transducer prototype in a specialized measurement stand with shielding from external electromagnetic interference.

3. Connect the prototype to the instrument's measuring terminals via a 1-meter RG-58 coaxial cable.

4. Automatic frequency sweep with the step specified above and recording the parameters R_s (active resistance) and X_s (reactive resistance).

5. Calculate the dynamic capacitance C_d using the formula: $C_d = -1 / (2\pi f X_s)$ for a capacitive load.

RESULTS AND DISCUSSION

Frequency dependence of the active component of the impedance

Experimental data on the frequency dependence of the active component of the impedance R_w for the studied prototypes are presented in Tab. 1.

Tab. 1. Active component of the transducer impedance

Analysis of results in the 12–21 kHz subrange

In the low-frequency range, all studied configurations demonstrate comparable R_w values in the 2915–3506 Ω range (see Fig. 2), indicating high efficiency in converting electrical energy into acoustic energy for all layout types. Relatively small differences ($\pm 10\%$) can be explained by variations in resonant frequencies due to manufacturing tolerances.

Fig. 2. Frequency dependence of the active component of the impedance of the converters, comparison of all measurements at frequencies of 12–21 kHz.

Analysis of results in the 22–35 kHz subrange

In the high-frequency subrange, a dramatic difference in the behavior of the transducers is observed:

1. The two-element prototype (No. 2) shows a maximum R_w value of 8000 Ω at a frequency of 29 kHz (see Fig. 3), which is 2.3 times higher than the values in the low-frequency range. This indicates the presence of high-Q resonance caused by the coordinated oscillation of two elements in phase.

2. Multi-element prototypes (No. 6 and No. 8) are characterized by a sharp decrease in R_w to values of 190 Ω and 42 Ω , respectively. This effect is explained by destructive interference of acoustic waves from different elements, leading to phase mismatches and a decrease in overall radiation efficiency.

Fig. 3. Frequency dependence of the active component of the impedance of the converters, comparison of all measurements at frequencies of 22–35 kHz.

The physical mechanism behind the observed differences is that, as frequency increases, the acoustic wavelength in piezoelectric ceramics becomes comparable to the dimensions of individual elements, leading to the emergence of a complex pattern of standing waves and phase shifts between elements. Similar effects were observed in the works [15] for composite rod transducers and [13] for multi-element systems.

Frequency dependence of dynamic capacitance

The results of dynamic capacitance C_d measurements are presented in Tab. 2.

Tab. 2. Dynamic capacitance of converters
--

Dynamic capacitance analysis

1. The increase in absolute C_d values with increasing number of elements (2→6→8) is due to the increase in the total active area of the piezoelectric ceramics and the corresponding increase in the electrical capacitance of the system.

2. The change in sign of the dynamic capacitance in the high-frequency range indicates a transition through resonance, at which the system's reactance changes from capacitive to inductive.

3. The largest range of C_d variation for the eight-element prototype (from +87 to -78 nF) indicates a more complex resonant structure of the multi-element system.

Evaluation of applicability for environmental monitoring

For low-frequency applications (12–21 kHz)

Recording large marine mammals (whales, dolphins) — all configurations demonstrate comparable performance. Dual-element configurations are recommended, as they are the easiest to manufacture.

For high-frequency applications (22–35 kHz)

Detecting small marine organisms and echolocation signals, dual-element configurations provide maximum sensitivity due to their high R_w . Multi-element configurations are preferable for broadband measurements.

Practical significance of the results

The data obtained enable an informed choice of transducer configuration based on the specifics of marine environmental monitoring tasks, thereby improving the efficiency of hydroacoustic systems and the quality of environmental research. The results are consistent with current trends in the development of specialized transducers for environmental applications [19] and can be used in the design of next-generation marine ecosystem monitoring systems [7, 9].

CONCLUSION

1. It was experimentally established that in the frequency range of 12–21 kHz, all studied transducer

configurations (2, 6, 8 elements) demonstrate comparable values of the active component of the impedance (2915–3506 Ω), which ensures their high efficiency for low-frequency marine ecology monitoring applications.

2. In the high-frequency range of 22–35 kHz, significant differences in electroacoustic characteristics were revealed: the two-element layout has a maximum $R_w = 8000 \Omega$, while multi-element configurations are characterized by significantly lower values (42–190 Ω) due to phase effects of element interaction.

3. The dynamic capacitance of the transducers varies over a wide range (from +87 to -78 nF) depending on the number of elements and frequency, with a change in the sign of the capacitance observed in the resonance region, indicating the complex resonant structure of multi-element systems.

4. It has been established that two-element configurations are most effective for high-frequency applications detecting small marine organisms, while multi-element transducers are preferable for broadband monitoring of marine ecosystems.

5. The scientific significance of this work lies in the acquisition of new experimental data

on the dependence of key electroacoustic parameters on the configuration of composite rod transducers, which expands the theoretical basis for designing hydroacoustic systems for environmental research.

6. The practical value of the results lies in the possibility of substantiating the selection of optimal transducer configurations for specific tasks of hydroacoustic monitoring of the marine environment, which contributes to the increased efficiency of environmental research and systems for monitoring anthropogenic impact on the oceans.

Prospects for further research include optimizing the geometric parameters of the overlays, conducting on-site tests in marine conditions, studying the influence of temperature and pressure on electroacoustic characteristics, and developing adaptive signal processing algorithms for various transducer configurations.

APPENDIX

Fig. II. Appearance of prototypes: prototype No. 2 (a), prototype No. 6 (б), prototype No. 8 (в).
--