

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-58-73>



УДК 681.586.48

### О влиянии неточностей изготовления конструктивных элементов пьезопреобразователя на длительность акустического зондирующего импульса

С. И. Коновалов<sup>1</sup> ✉, М. С. Вечёра<sup>1</sup>, Р. С. Коновалов<sup>1,2</sup>,  
В. М. Цаплев<sup>1</sup>, З. М. Юлдашев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)  
ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, г. Санкт-Петербург 197022, Российская Федерация

<sup>2</sup> Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I  
пр-т Московский, д. 9, г. Санкт-Петербург 190031, Российская Федерация

✉ e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

#### Резюме

**Цель исследования** – определить длительность излучаемых пьезоэлектрическим преобразователем акустических сигналов при малых отклонениях (увеличении или уменьшении) толщины согласующего слоя и его удельного акустического сопротивления от оптимальных значений.

**Методы.** Объект исследований – пьезоэлектрические преобразователи пластинчатого типа, нагруженные на водную среду. Для расчета использован метод эквивалентных схем пьезопреобразователей и спектральный метод на основе преобразований Фурье. Методом эквивалентных схем определены частотные характеристики пьезопреобразователей. Для импульса электрического возбуждения конкретной формы с помощью прямого преобразования Фурье определяется его спектральная функция. Обратным преобразованием Фурье находится вид зондирующего акустического импульса. На основании анализа импульсного режима работы пьезопреобразователей определяются зависимости длительностей зондирующего сигнала от оптимальных значений волновой толщины согласующего слоя и его удельного акустического сопротивления.

**Результаты.** На основе анализа работы пьезопреобразователей выделены основные причины нарушения идентичности их свойств. Для различных степеней демпфирования пьезопреобразователя определены формы зондирующих сигналов, излучаемых в воду. Проведена оценка влияния неточностей изготовления слоя на длительность зондирующего сигнала. Определена длительность излучаемых пьезоэлектрическим преобразователем акустических сигналов при малых отклонениях (увеличении или уменьшении) толщины согласующего слоя и его удельного акустического сопротивления от оптимальных значений.

---

© Коновалов С. И., Вечёра М. С., Коновалов Р. С., Цаплев В. М., Юлдашев З. М., 2025

**Заключение.** Полученные результаты предназначены для оценки качества заготовок конструктивных элементов пьезопреобразователей при их изготовлении малыми партиями, когда неизбежны погрешности соблюдения толщины согласующего слоя и значения его удельного акустического сопротивления как внутри одной партии, так и между партиями.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль; пьезоэлектрический преобразователь; зондирующий акустический импульс.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

**Для цитирования:** О влиянии неточностей изготовления конструктивных элементов пьезопреобразователя на длительность акустического зондирующего импульса / С. И. Коновалов, М. С. Вечёра, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев, З. М. Юлдашев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 2. С. 58–73. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-58-73>

Поступила в редакцию 11.04.2025

Подписана в печать 09.05.2025

Опубликована 30.06.2025

## On the influence of manufacturing inaccuracies of the structural elements of a piezoelectric transducer on the duration of an acoustic probing pulse

Sergey I. Konovalov<sup>1</sup>✉, Mikhail S. Vechera<sup>1</sup>, Roman S. Konovalov<sup>1,2</sup>,  
Valery M. Tsaplev<sup>1</sup>, Zafar M. Yuldashev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"  
5/F Professora Popova Str., St. Petersburg 197022, Russian Federation

<sup>2</sup> Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University  
9 Moskovsky Ave., St. Petersburg 190031, Russian Federation

✉ e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

### Abstract

**The purpose of the research** is to determine the duration of acoustic signals emitted by a piezoelectric transducer with small deviations (increase or decrease) in the thickness of the matching layer and its specific acoustic resistance from the optimal values.

**Methods.** The object of the study is plate-type piezoelectric transducers loaded onto an water medium. The calculation was performed using the equivalent circuit method of piezoelectric transducers and the spectral method based on Fourier transforms. The equivalent circuit method is used to determine the frequency characteristics of piezoelectric transducers. For an electrical excitation pulse of a specific shape, its spectral function is determined using the direct Fourier transform. The type of the probing acoustic pulse is found using the inverse Fourier transform. Based on the analysis of the pulsed operating mode of piezoelectric transducers, the dependences of the probing signal durations on the optimal values of the wave thickness of the matching layer and its specific acoustic resistance are determined.

**Results.** Based on the analysis of the operation of piezoelectric transducers, the main causes of violation of the identity of their properties are identified. For different degrees of damping of the piezoelectric transducer, the shapes of the probing signals radiated into water are determined. The effect of inaccuracies in the manufacture of the layer on the

duration of the probing signal is assessed. The duration of acoustic signals emitted by a piezoelectric transducer is determined with small deviations (increase or decrease) in the thickness of the matching layer and its specific acoustic resistance from the optimal values.

**Conclusion.** The obtained results are intended to assess the quality of blanks of structural elements of piezoelectric transducers during their manufacture in small batches, when errors in maintaining the thickness of the matching layer and the value of its specific acoustic resistance are inevitable both within one batch and between batches.

**Keywords:** non-destructive testing; piezoelectric transducer; acoustic pulse probe.

**Conflict of interest:** The authors declares no conflict of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Konovalov S.I., Vechera M.S., Konovalov R.S., Tsaplev V.M., Yuldashev Z.M. On the influence of manufacturing inaccuracies of the structural elements of a piezoelectric transducer on the duration of an acoustic probing pulse. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering.* 2025;15(2):58-73. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2025-15-2-58-63>

Received 11.04.2025

Accepted 09.05.2025

Published 30.06.2025

\*\*\*

## Введение

В настоящее время методы неразрушающего контроля (НК) применяются практически во всех отраслях народного хозяйства. Среди различных видов НК акустический контроль занимает одно из лидирующих положений, что объясняется целым рядом его достоинств, среди которых можно выделить относительную простоту, дешевизну, возможность одностороннего доступа к объекту контроля, безопасность для персонала, получение результатов контроля в режиме реального времени и т. д. Существует большое количество вариантов реализации упомянутого вида контроля, однако, общим для них является наличие электроакустических преобразователей, предназначенных для излучения и приема акустических сигналов. Эти преобразователи могут строиться на различных физических принципах. Можно выделить ряд обзорных публикаций, касающихся следующих физических принци-

пов построения преобразователей, например: пьезоэлектрические [1], электромагнитно-акустические [2], с использованием лазерного возбуждения [3] и др. В последние годы активно развиваются емкостные микромашинные ультразвуковые преобразователи [4], являющиеся электростатическими преобразователями. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Это объясняется широтой и универсальностью их применения [5]. Конструктивно данный тип преобразователей использует в качестве активного элемента материалы из пьезоэлектрических монокристаллов [6], пьезокерамики [1], пьезополимеров [7] и др.

Значительную ценность для разработчиков пьезоаппаратуры НК представляют собой работы, посвященные рассмотрению подходов к исследованию и разработке ПЭП стержневого типа с амплитудно-фазовым возбуждением [8] и пластинчатого типа [9]. ПЭП

пластинчатого типа нашли активное применение не только для ультразвукового НК, но и в области толщинометрии [10]. Подобные ПЭП позволяют обеспечить получение короткого зондирующего сигнала на основе применения механического демпфирования и согласующих слоев [9], корректирующих электрических цепей [9; 11] и др.

Говоря о системном подходе к формированию зондирующих сигналов малой длительности, нельзя не упомянуть о применении сложных сигнальных последовательностей для возбуждения пьезоэлемента [9]. Также активно используются методы обработки измерительной информации [12]. Например, в толщинометрии разработаны методы для измерения скорости и затухания ультразвука [13]. Их можно разделить на три категории: классические методы определения времени прошедшего через образец сигнала, основанные на пороговой или пиковой оценке сигнала [13]; методы кросс-корреляции (фазовой корреляции [12], кросс-корреляции с лазерным зондированием [14] и кросс-корреляции на основе преобразования Гильберта [15]); методы оценки параметров, основанные на моделях эхосигналов. Целью последней группы методов является разработка более точных моделей эхосигналов [16] и более эффективных и точных алгоритмов их оптимизации [17; 18]. По сравнению с пороговыми и корреляционными методами методы оценки на основе моделей эхосигналов не только обладают высокой точностью

обнаружения, но и ярко выраженной способностью к помехоустойчивости.

В практике акустического НК довольно часто применяется иммерсионный вариант контроля, когда ультразвуковой сигнал вводится в изделие через слой жидкости (например, воды) определенной толщины. При нагрузке на жидкие среды весьма распространенным является использование преобразователей с согласующим четвертьволновым слоем и демпфером. Это необходимо для лучшего согласования активного элемента (он обычно выполняется из пьезокерамики) с акустической нагрузкой. Наиболее часто применяемая конструкция ПЭП, предназначенного для целей иммерсионного контроля, содержит в своем составе активный элемент, демпфер и согласующий слой (два слоя используются редко). Вопросы разработки ПЭП, в т. ч. и иммерсионных, технологии их изготовления и измерения основных рабочих параметров подробно рассмотрены в научно-технической литературе [19]. Следует сказать, что при проектировании многоканальных автоматизированных дефектоскопических установок важным обстоятельством является соблюдение идентичности параметров ПЭП, входящих в их состав. Это во многом определяется точностью изготовления некоторых конструктивных элементов ПЭП. Особую значимость указанный фактор имеет при изготовлении ПЭП малыми партиями.

Широкое применение демпфированных преобразователей, вероятно,

можно объяснить относительной простотой их изготовления, дешевизной, высокой степенью идентичности характеристик при серийном производстве. Наиболее часто используются демпферы с порошковыми наполнителями. В них применяются композитные материалы, состоящие из рассеивателей и связующего компонента. Они широко используются в искателях дефектоскопов и акустических зондов, применяемых в аппаратуре медико-биологической диагностики. Требования к демпферам не являются жесткими. По данным [19], они вполне удовлетворительно работают уже в случае, при котором значение их эффективного удельного акустического сопротивления близко к 0,35 от значения удельного акустического сопротивления пьезокерамики. Достижение этого условия легко выполнимо при изготовлении демпферов. Именно поэтому на идентичность свойств ПЭП при их изготовлении малыми партиями влияют в первую очередь не свойства демпферов. Она определяется точностью соблюдения параметров согласующих слоев при изготовлении их внутри партии и между партиями.

Известно, что согласующие слои выполняют свои функции при соблюдении двух условий [19]:

а) их толщина должна составлять четверть длины волны в материале слоя на рабочей частоте ПЭП;

б) удельное акустическое сопротивление слоя  $Z_{\text{сл}}$  должно удовлетворять условию  $Z_{\text{сл}} = \sqrt{Z_{\text{пз}} Z_{\text{н}}}$ , где  $Z_{\text{сл}}$ ,  $Z_{\text{пз}}$  и

$Z_{\text{н}}$  – удельные акустические сопротивления материалов слоя, пьезоэлемента и акустической нагрузки. Естественно, что нарушение перечисленных условий влечет за собой снижение эффективности работы ПЭП.

Говоря о качественной работе согласующих слоев, необходимо отметить, что при выпуске ПЭП малыми партиями причинами отсутствия идентичности ПЭП как внутри одной партии, так и между партиями часто могут являться:

– несоблюдение идентичности толщины согласующих слоев. Разброс в толщинах слоев происходит при шлифовке заготовок. Они наклеиваются в количестве нескольких десятков штук на планшайбу и далее обрабатываются с применением шлифовального порошка на станке, аналогичном обычному гончарному кругу. При этом далеко не всегда удается даже внутри одной партии обеспечить одинаковую толщину каждой заготовки. Это происходит и в том случае, когда используются так называемые «паразитные» прокладки (их наклеивают по краям планшайбы, чтобы избежать разброса в толщине слоев вследствие прижима планшайбы к вращающемуся столу с различной силой). Естественно, между партиями также наблюдается разброс толщин слоев;

– невозможность соблюдения (между различными партиями изготавливаемых ПЭП) полной идентичности смеси, которая предназначается для изготовления (после ее полимеризации) заготовок слоев. Это сказывается на

значении удельных акустических сопротивлений материала используемых согласующих слоев. В качестве этого материала часто используются акриловые пластмассы с добавлением мелкодисперсного порошка маршалита. Указанное обстоятельство приводит к разбросу значений удельного акустического сопротивления согласующих слоев между различными партиями ПЭП.

Будем оптимальными называть такие параметры слоев, которые отвечают выполнению названных условий.

Целью настоящей работы является проведение оценок допустимых отклонений указанных параметров согласующих слоев от их оптимальных значений с целью отбраковки заготовок слоев на ранних стадиях изготовления ПЭП.

### Материалы и методы

Будем рассматривать демпфированную пьезокерамическую пластину, нагруженную на водную среду через согласующий четвертьволновый слой. В качестве материала пьезокерамики выберем, например, ЦТБС-3. Схема рассматриваемой задачи показана ниже (рис. 1). Введем следующие обозначения:  $z_d$ ,  $z_k$ ,  $z_{cl}$  и  $z_b$  – удельные акустические сопротивления демпфера, керамики, слоя и воды соответственно. Известно, что  $z_b = 1,5 \cdot 10^6$  Па·с/м. Электрическим возбуждающим сигналом служит подаваемое на пьезоэлемент напряжение  $U$ .

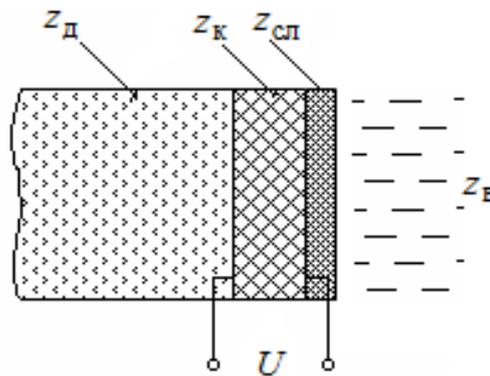


Рис. 1. Геометрическая модель задачи

Fig. 1. Geometric model of the problem

Пусть пьезокерамическая пластина возбуждается импульсом электрического напряжения в виде одного полупериода синусоиды на собственной частоте (частоте антирезонанса). Задача сводится к определению формы акустического зондирующего сигнала, т. е. акустического импульса колебательной скорости, излучаемого в водную среду. Методика определения такого сигнала подробно представлена в литературе, например в [20]. Она состоит в использовании аппарата эквивалентных схем пьезопреобразователей и применении спектрального метода на основе преобразований Фурье. С помощью схем-аналогов определяется частотная характеристика ПЭП. Затем, задавшись формой электрического возбуждающего сигнала, с помощью прямого преобразования Фурье определяется его спектральная функция. Далее, с помощью обратного преобразования Фурье находится вид излучаемого сигнала. Длительность этого импульса  $\tau_n$  будем определять по уровню  $-20$  дБ. Для

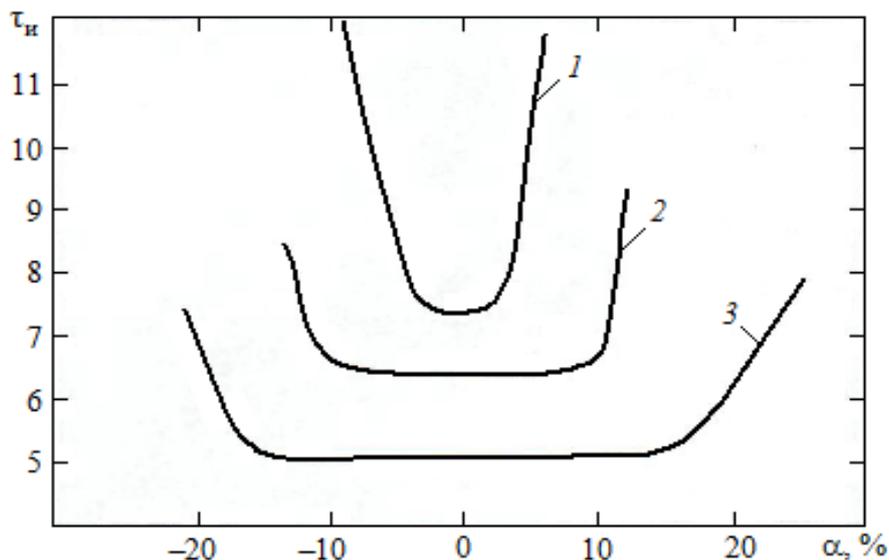
решения задачи в наиболее общем виде целесообразно использовать безразмерное время  $T = t/(T_0/2)$  ( $t$  – физическое время,  $T_0$  – период антирезонансной частоты). Это позволит оценивать длительность зондирующего сигнала не единицами времени, а числом полупериодов колебаний пластины на собственной частоте.

### Результаты и их обсуждение

Выше были сформулированы две довольно частые причины отсутствия высокой степени идентичности ПЭП, выпускаемых малыми партиями. Целесообразно рассмотреть их отдельно друг от друга.

**Причина № 1.** С целью удобства обсуждения и интерпретации численных

результатов целесообразно ввести новый параметр  $\alpha$ . Он будет характеризовать отклонение в процентах (в большую или меньшую стороны) толщины согласующего слоя от толщины, соответствующей четверти длины волны в материале слоя. Так, например, значение  $\alpha = 0$  будет означать, что толщина слоя точно соответствует четвертьволновой. При  $\alpha = \pm 5\%$  можно говорить о том, что толщина «ушла» в большую или меньшую сторону на одну двадцатую. Если  $\alpha = \pm 10\%$ , то отклонение толщины слоя от четверти длины волны составляет одну десятую и т. п. На рисунке 2 показаны зависимости  $\tau_n(\alpha)$  для различных степеней демпфирования ПЭП.



**Рис. 2.** Зависимость  $\tau_n(\alpha)$  при различных значениях  $Z_d$ : кривая 1 –  $Z_d = 0$ ; 2 –  $Z_d = 5 \cdot 10^6$  Па·с/м; 3 –  $Z_d = 10 \cdot 10^6$  Па·с/м

**Fig. 2.** Dependence  $\tau_n(\alpha)$  for different values of  $Z_d$ : curve 1 –  $Z_d = 0$ ; 2 –  $Z_d = 5 \cdot 10^6$  Pa·s/m; 3 –  $Z_d = 10 \cdot 10^6$  Pa·s/m

Из анализа материала, представленного на рисунке 2, можно сделать некоторые выводы. Так, форма кривой 1 (она соответствует случаю  $z_d = 0$ ) позволяет утверждать, что при  $z_d = 0$  минимум сигнала, соответствующий случаю, при котором толщина слоя точно равна четверти длины волны ( $\alpha = 0$ ), составляет 7,5 полупериода колебаний на собственной (антирезонансной) частоте пластины. Очень малые отклонения  $\alpha$  от значения  $\alpha = 0$  влекут за собой возрастание длительности зондирующего импульса. Допустимые отклонения, при которых можно условно полагать, что акустический сигнал еще не растет, по длительности, составляют всего лишь около  $\pm 4\%$ . Возрастание параметра  $z_d$  приводит к менее заметной зависимости  $\tau_n$  от  $\alpha$ . Примером тому может служить поведение кривой 2 (она соответствует случаю  $z_d = 5 \cdot 10^6$  Па·с/м). Даже при  $\alpha \approx \pm(8-10)\%$  длительность импульса практически не возрастает относительно ее минимального значения в 6,5 полупериода. При  $z_d = 10 \cdot 10^6$  Па·с/м (кривая 3) можно считать, что даже

$\alpha \approx \pm 15\%$  не ведет к увеличению  $\tau_n$ , которая в этом случае составляет около пяти полупериодов колебаний на собственной частоте пластины. Стоит заметить, что отмеченные малые изменения параметра  $\alpha$  не влекут за собой изменений в значениях амплитуд акустических сигналов. Не изменяется и основная часть импульсов. Некоторые отличия наблюдаются лишь в «хвосте» сигнала. Наличие пологих участков на кривых 1–3 объясняется тем, что амплитуды отдельных (заключительных) полупериодов излучаемых сигналов (их длительность измеряется по уровню  $-20$  дБ) в указанных диапазонах изменения параметра  $\alpha$  еще не достигает 0,1 от максимума.

В таблице 1 подробно представлен целый ряд промежуточных значений удельных акустических сопротивлений демпфера и соответствующих им значений параметра  $\alpha$ .

Значения  $z_d$ , превышающие  $10 \cdot 10^6$  Па·с/м и соответствующие им значения параметра  $\alpha$ , в таблице 1 не представлены, поскольку в этом случае возникновение технологических трудностей, связанных с изготовлением заготовок для согласующих слоев, становится маловероятным.

**Таблица 1.** Значения  $z_d$  и соответствующие им допустимые значения параметра  $\alpha$

**Table 1.** Values of  $z_d$  and corresponding permissible values of the parameter  $\alpha$

$z_d = 10^{-6}$ , Па·с/м / $z_d = 10^{-6}$ , Pa·s/m	0	3	5	7	10
$\alpha$ , %	$\pm 4$	$\pm 6$	$\pm 10$	$\pm 12$	$\pm 15$

На рисунке 2 показаны зависимости, отражающие изменения длительности зондирующего сигнала от значений параметра  $\alpha$  при различных степенях демпфирования активного элемента ПЭП. Определенный интерес могут

представить значения длительностей сигналов при отсутствии согласующего слоя, когда используется только механические демпфирование. Так, в таблице 2 приведены значения длительностей акустических импульсов для различных  $z_d$ .

**Таблица 2.** Значения  $\tau_{и}$  при отсутствии согласующего слоя для различных  $z_d$

**Table 2.** Values of  $\tau_{и}$  the absence of a matching layer for various  $z_d$

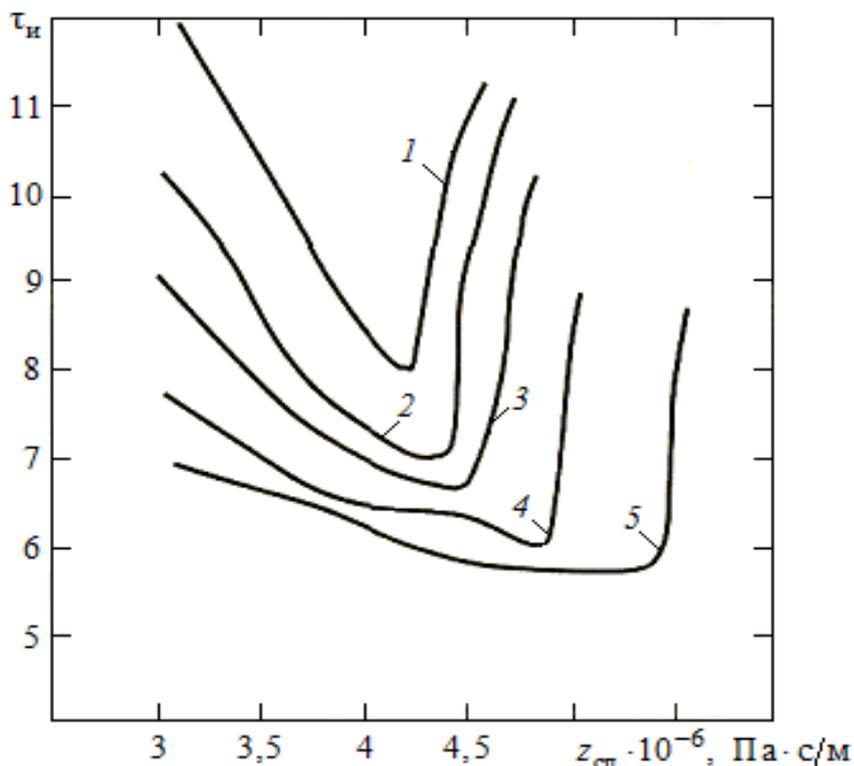
$z_d = 10^{-6}$ , Па·с/м / $z_d = 10^{-6}$ , Pa·s/m	0	5	10	15	20
$\tau_{и}$ $\tau_{р}$	Более 20	11,4	6,6	5,3	4,2

Можно видеть, что отсутствие согласующего слоя весьма заметно сказывается на работе ПЭП. Стоит также заметить, что для случая, при котором  $z_d = z_k$  (гипотетический вариант реализации ПЭП), длительность сигнала составляет  $\tau_{и} = 2,7$  полупериода.

**Причина № 2.** Будем по-прежнему расчетное исследование зависимостей длительностей зондирующих сигналов от значений удельных акустических сопротивлений согласующих слоев при различных степенях демпфирования активного элемента ПЭП проводить, используя методику описанную выше. Это позволит определять формы излучаемых в исследуемую среду акустических сигналов. На основании обработки полученных результатов можно построить семейство кривых, приведенных на рисунке 3.

При изготовлении иммерсионных преобразователей обычно ограничиваются степенями демпфирования пьезоэлемента  $z_d = (8-10) \cdot 10^6$  Па·с/м. Это позволяет, с одной стороны, обеспечить уже достаточно серьезное демпфирование активного элемента ПЭП, а с другой – еще не требует использования специальных технологий и материалов, необходимых к применению для получения более значительных  $z_d$ . Данное обстоятельство объясняет ограничение рассмотрения  $z_d$  указанным значением.

Из данных, приведенных на рисунке 3, видно, что при  $z_d = 0$  (кривая 1) минимально достижимая длительность зондирующего сигнала составляет примерно 8 полупериодов. Это наблюдается при  $z_{сл}$ , равном  $4,25 \cdot 10^6$  Па·с/м.



**Рис. 3.** Зависимости длительностей излучаемых сигналов  $\tau_n$  от значений удельных акустических сопротивлений слоев при различных значениях  $z_d$ : кривая 1 соответствует  $z_d = 0$ ; 2 –  $z_d = 2 \cdot 10^6$  Па·с/м; 3 –  $z_d = 4 \cdot 10^6$  Па·с/м; 4 –  $z_d = 6 \cdot 10^6$  Па·с/м; 5 –  $z_d = 8 \cdot 10^6$  Па·с/м

**Fig. 3.** Dependences of the durations of emitted signals on the values of  $\tau_n$  specific acoustic resistances of layers at different values of  $z_d$ : curve 1 corresponds to  $z_d = 0$ ; 2 –  $z_d = 2 \cdot 10^6$  Pa·s/m; 3 –  $z_d = 4 \cdot 10^6$  Pa·s/m; 4 –  $z_d = 6 \cdot 10^6$  Pa·s/m; 5 –  $z_d = 8 \cdot 10^6$  Pa·s/m

Отклонение  $z_d$  в сторону увеличения или уменьшения даже на очень малые величины неизбежно влечет за собой возрастание длительности зондирующего сигнала, т. е. возможный диапазон изменения  $z_{сл}$ , не вызывающий увеличения  $\tau_n$ , оказывается крайне узким. Необходимо ввести некоторый критерий, определяющий нижнюю и верхнюю границы изменения диапазона  $z_{сл}$ . Договоримся считать, что длительность сигнала увеличивается незначительно, если

это увеличение не превышает половину полупериода сигнала. Эту величину будем считать критерием, определяющим допустимое увеличение длительности  $\tau_n$ . Пусть  $z_n$  и  $z_v$  соответствуют нижней и верхней границам диапазона допустимого изменения  $z_{сл}$ . Эти границы могут быть определены из анализа материалов, представленных на рисунке 3 (см. кривые 1–5). Они приведены в ниже (табл. 3).

**Таблица 3.** Допустимые границы диапазонов изменения  $z_{сл}$  при различных значениях  $z_d$

**Table 3.** Permissible limits of the ranges of change  $z_{сД}$  for different values of  $z_{Д}$ 

$z_{Д} \cdot 10^{-6}$ , Па·с/м $z_{Д} \cdot 10^{-6}$ , Pa·s/m	0	2	4	6	8
$z_{Н} \cdot 10^{-6}$ , Па·с/м $z_{Н} \cdot 10^{-6}$ , Pa·s/m	4	3,8	3,9	3,8	4
$z_{В} \cdot 10^{-6}$ , Па·с/м $z_{В} \cdot 10^{-6}$ , Pa·s/m	4,3	4,4	4,6	4,9	5,4

Представленные в таблице 3 результаты могут играть роль оценочных значений границ допустимых диапазонов изменения удельного акустического сопротивления заготовок для изготовления согласующего слоя.

### Выводы

Таким образом, на основании расчетного исследования работы ПЭП в импульсном режиме получены оценочные значения допустимых отклонений толщины согласующего слоя от четвертьволновой, не вызывающие увеличения длительности излучаемых иммерсионным ПЭП акустических сигналов.

Определены границы диапазонов изменения удельных акустических сопротивлений согласующего слоя, при которых длительность зондирующих сигналов сохраняется. Указанные исследования осуществлены для различных степеней демпфирования пластинчатых ПЭП. Результаты работы могут быть использованы при изготовлении малых партий преобразователей, предназначенных для осуществления неразрушающего контроля. Они могут быть применены для отбраковки заготовок согласующих четвертьволновых слоев на ранних стадиях изготовления ПЭП.

### Список литературы

1. Uchino K. Piezoelectric Devices for Sustainability Technologies // Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition). 2024. Vol. 3. P. 463–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00014-0>
2. Memon A., Alhems L. EMAT Generated Guided Waves in Pipes: A Review // e-Journal of Nondestructive Testing. 2023. Vol. 28(10). <https://doi.org/10.58286/28711>
3. Application of Laser Ultrasonic Testing Technology in The Characterization of Material Properties: A Review / Y. Lian, F. Du, L. Xie, Q. Hu, P. Jin, Y. Wang, Z. Lu. //

Measurement. 2024. Vol. 234. P. 114855. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114855>Get rights and content

4. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Technology and Application / M. Sabri Salim, M. F. A. Malek, R. B. W. Heng, K. M. Juni, N. Sabri // Journal of Medical Ultrasound. 2012. Vol. 20, is. 1. P. 8–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmu.2012.02.001>

5. Applications of Piezoelectric-Based Sensors, Actuators, and Energy Harvesters / M. Ali Mangi, H. Elahi, A. Ali, H. Jabbar, A. Bin Aqeel, A. Farrukh, S. Bibi, W. A. Altabey, S. A. Kouritem, M. Noori // Sensors and Actuators Reports. 2025. Vol. 9. P. 100302. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100302>

6. Piezoelectric Single Crystal Ultrasonic Transducers for Biomedical Applications / Q. Zhou, K. Ho Lam, H. Zheng, W. Qiu, K. Kirk Shung // Progress in Materials Science. 2014. Vol. 66. P. 87–111. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.06.001>

7. Piezoelectric Films for High Frequency Ultrasonic Transducers in Biomedical Applications / Q. Zhou, S. Lau, D. Wu, K. Kirk Shung // Progress in Materials Science. 2011. Vol. 56, is. 2. P. 139–174. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.09.001>

8. Степанов Б. Г. Пьезоэлектрические преобразователи стержневого и пластинчатого типов с амплитудно-фазовым возбуждением. Задачи синтеза и анализа. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 220 с.

9. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Физические основы работы и проектирования импульсных пьезопреобразователей в задачах измерения и контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.

10. Review of Ultrasonic-Based Technology for Oil Film Thickness Measurement in Lubrication / P. Dou, Y. Jia, P. Zheng, T. Wu, M. Yu, T. Reddyhoff, Z. Peng // Tribology International. 2022. Vol. 165. P. 107290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107290>

11. Precise experimental determination of electrical equivalent circuit parameters for ultrasonic piezoelectric ceramic transducers from their measured characteristics / P. P. Janů, J. Bajer, P. Dyčka, R. Bystřický // Ultrasonics. 2021. Vol. 112. P. 106341. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106341>

12. Liu W., Li D., Xie W. A Novel Time-of-Flight Difference Determination Method for Ultrasonic Thickness Measurement With Ultrasonic Echo Onset Point Detection // Applied Acoustics. 2025. Vol. 233. P. 110605. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110605>

13. Eason T. J., Bond L. J., Lozev M. G. Structural health monitoring ultrasonic thickness measurement accuracy and reliability of various time-of-flight calculation methods // 42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability. Minneapolis, 2016. Vol. 1706. P. 200003. <https://doi.org/10.1063/1.4940647>

14. A High-Resolution Ultrasonic Ranging System Using Laser Sensing and a Cross-Correlation Method / L. Jia, B. Xue, S. Chen, H. Wu, X. Yang, J. Zhai, Z. Zeng // *Applied Sciences*. 2019. Is. 9. P. 1483. <https://doi.org/10.3390/app9071483>

15. Cross Correlation-Based Ultrasonic Gas Flow Sensor With Temperature Compensation / J. R. G. Oya, E. H. Fort, D. N. Miguel, A. S. Rojas, R. G. Carvajal, F. M. Chavero // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. Vol. 72. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3293139>

16. Dual Gaussian attenuation model of ultrasonic echo and its parameter estimation / D. Wang, Z. Wang, P. Li, Y. Chen, H. Li // *AIP Advances*. 2019. N 9(5). P. 055213. <https://doi.org/10.1063/1.5095994>

17. Parameter estimation for ultrasonic echo signals through improved matching pursuit and flower pollination algorithms / M. Chang, Z. Lu, Q. Huang, C. Yang // *Measurement*. 2022. Vol. 194. P. 111010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111010>

18. Xiong J., Mao P., Li X. Enhancing Ultrasonic Time-of-Flight Estimation Using Adaptive Differential Evolution and Levenberg–Marquardt Algorithm // *IEEE Sensors Journal*. 2024. Vol. 24, N 2. P. 1224–1232. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3324502>

19. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

20. Коновалов С. И., Юлдашев З. М. Формирование зондирующих сигналов пьезоэлектрических преобразователей для ультразвукового контроля // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. 2023. Т. 26, № 1. С. 87–98. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-87-98>

## References

1. Uchino K. Piezoelectric Devices for Sustainability Technologies. *Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition)*. 2024;3:463–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00014-0>

2. Memon A., Alhems L. EMAT Generated Guided Waves in Pipes: A Review. *e-Journal of Nondestructive Testing*. 2023;28(10). <https://doi.org/10.58286/28711>

3. Lian Y., Du F., Xie L., Hu Q., Jin P., Wang Y., Lu Z. Application of Laser Ultrasonic Testing Technology in The Characterization of Material Properties: A Review. *Measurement*. 2024;234:114855. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114855> Get rights and content

4. Sabri Salim M., Malek M. F. A., Heng R. B. W., Juni K. M., Sabri N. Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers: Technology and Application. *Journal of Medical Ultrasound*. 2012;20(1):8–31. <https://doi.org/10.1016/j.jmu.2012.02.001>

5. Ali Mangi M., Elahi H., Ali A., Jabbar H., Aqeel Bin A., Farrukh A., Bibi S., Altabay W. A., Kouritem S. A., Noori M. Applications of Piezoelectric-Based Sensors, Actuators, and Energy Harvesters. *Sensors and Actuators Reports*. 2025;9:100302. <https://doi.org/10.1016/j.snr.2025.100302>

6. Zhou Q., Ho Lam K., Zheng H., Qiu W., Kirk K. Shung. Piezoelectric Single Crystal Ultrasonic Transducers for Biomedical Applications. *Progress in Materials Science*. 2014;66:87–111. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.06.001>

7. Zhou Q., Lau S., Wu D., Shung K. Kirk. Piezoelectric Films for High Frequency Ultrasonic Transducers in Biomedical Applications. *Progress in Materials Science*. 2011;56(2):139–174. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.09.001>

8. Stepanov B.G. Piezoelectric transducers of rod and plate types with amplitude-phase excitation. Problems of synthesis and analysis. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU "LETI"; 2019. 220 p. (In Russ.)

9. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. Physical foundations of operation and design of pulse piezoelectric transducers in measurement and control problems. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGETU "LETI"; 2016. 228 p. (In Russ.)

10. Dou P., Jia Y., Zheng P., Wu T., Yu M., Reddyhoff T., Peng Z. Review of Ultrasonic-Based Technology for Oil Film Thickness Measurement in Lubrication. *Tribology International*. 2022;165:107290. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107290>

11. Janů P.P., Bajer J., Dyčka P., Bystřický R. Precise experimental determination of electrical equivalent circuit parameters for ultrasonic piezoelectric ceramic transducers from their measured characteristics. *Ultrasonics*. 2021;112:106341. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106341>

12. Liu W., Li D., Xie W. A Novel Time-of-Flight Difference Determination Method for Ultrasonic Thickness Measurement With Ultrasonic Echo Onset Point Detection. *Applied Acoustics*. 2025;233:110605. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2025.110605>

13. Eason T.J., Bond L.J., Lozev M.G. Structural health monitoring ultrasonic thickness measurement accuracy and reliability of various time-of-flight calculation methods. In: *42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability*. Vol. 1706. Minneapolis; 2016. P. 200003. 2016;1706:200003. <https://doi.org/10.1063/1.4940647>

14. Jia L., Xue B., Chen S., Wu H., Yang X., Zhai J., Zeng Z. A High-Resolution Ultrasonic Ranging System Using Laser Sensing and a Cross-Correlation Method. *Applied Sciences*. 2019;(9):1483. <https://doi.org/10.3390/app9071483>

15. Oya J. R. G., Fort E. H., Miguel D. N., Rojas A. S., Carvajal R. G., Chavero F. M. Cross Correlation-Based Ultrasonic Gas Flow Sensor With Temperature Compensation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023;72:1–4. <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3293139>

16. Wang D., Wang Z., Li P., Chen Y., Li H. Dual Gaussian attenuation model of ultrasonic echo and its parameter estimation. *AIP Advances*. 2019;(9):055213. <https://doi.org/10.1063/1.5095994>

17. Chang M., Lu Z., Huang Q., Yang C. Parameter estimation for ultrasonic echo signals through improved matching pursuit and flower pollination algorithms. *Measurement*. 2022;194:111010. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111010>

18. Xiong J., Mao P., Li X. Enhancing Ultrasonic Time-of-Flight Estimation Using Adaptive Differential Evolution and Levenberg–Marquardt Algorithm. *IEEE Sensors Journal*. 2024;24(2):1224–1232. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3324502>

19. Ermolov I.N. (ed.). Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Nondestructive Testing. Moscow: Mashinostroenie; 1986. 280 p. (In Russ.)

20. Konovalov S.I., Yuldashev Z.M. Formation of Probing Signals of Piezoelectric Transducers for Ultrasonic Testing. *Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2023;26(1):87–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-1-87-98>

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Коновалов Сергей Ильич**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5033-344X

**Sergey I. Konovalov**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: sikonovalov.eut@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5033-344X

**Вечёра Михаил Сергеевич**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vechiora.mihail@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-0018-6810

**Mikhail S. Vechera**, Post-Graduate Student, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: vechiora.mihail@yandex.ru, ORCID: 0009-0003-0018-6810

**Коновалов Роман Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина); доцент, Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: rskonovalov@etu.ru, ORCID: 0000-0002-0155-2718

**Roman S. Konovalov**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"; Associate Professor, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: rskonovalov@etu.ru, ORCID: 0000-0002-0155-2718

**Цаплев Валерий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [valery@convergences-fr.ru](mailto:valery@convergences-fr.ru), ORCID: 0000-0002-7386-7233

**Valery M. Tsaplev**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: [valery@convergences-fr.ru](mailto:valery@convergences-fr.ru), ORCID: 0000-0002-7386-7233

**Юлдашев Зафар Мухамедович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехнических систем, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: [yuld@mail.ru](mailto:yuld@mail.ru), ORCID: 0000-0003-1075-3420

**Zafar M. Yuldashev**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department of Biotechnical Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", St. Petersburg, Russian Federation, e-mail: [yuld@mail.ru](mailto:yuld@mail.ru), ORCID: 0000-0003-1075-3420