

Исследование импульсного режима работы пьезопреобразователя иммерсионного дефектоскопа

С. И. Коновалов¹✉, Р. С. Коновалов^{1,2}, В. М. Цаплев¹, Д. И. Полосухина¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Санкт-Петербург, Россия

✉ sikonovalov.eut@gmail.com

Аннотация

Цель работы: Оценить влияние формы сложного электрического сигнала на входе пьезопреобразователя на длительность излучаемого им акустического сигнала.

Материалы и методы: Использовано теоретическое моделирование методом Даламбера для односторонне нагруженной пьезопластины.

Результаты: Исследована динамика изменения зондирующего сигнала в зависимости от момента подачи корректно сформированного компенсирующего полупериода. Проведено сравнение форм зондирующих сигналов для случаев присутствия и отсутствия демпфера на тыльной стороне пластины. Показана возможность получения сигналов различной длительности. Установлено, что при подаче сложного электрического сигнала на пьезоэлемент демпфированного ПЭП формируется зондирующий сигнал с более высоким уровнем осцилляций (при неполной компенсации), чем для недемпфированного преобразователя.

Заключение: Рассмотрен пьезопреобразователь пластинчатого типа, предназначенный для излучения коротких зондирующих сигналов, что достигается путем его возбуждения электрическими сигналами сложной формы. Задача решена методом Даламбера для односторонне нагруженной пьезопластины. В качестве акустической нагрузки выбрана водная среда. Пластина рассмотрена в двух вариантах – с демпфером и без него.

Ключевые слова: пьезопреобразователь, демпфер, электрическая компенсация, импульсный режим, метод Даламбера

Для цитирования: Исследование импульсного режима работы пьезопреобразователя иммерсионного дефектоскопа / С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев, Д. И. Полосухина // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 5. С. 32–39. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-32-39.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Study of the Pulsed Operating Mode of the Piezoelectric Transducer of an Immersion Flaw Detector

S. I. Konovalov¹✉, R. S. Konovalov^{1,2}, V. M. Tsaplev¹, D. I. Polosukhina¹

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia

✉ sikonovalov.eut@gmail.com

Abstract

Purpose of the work: To evaluate the influence of the shape of a complex electrical signal at the input of a piezoelectric transducer on the duration of the acoustic signal emitted by it.

Materials and methods: Theoretical modeling using the d'Alembert method for a one-sided loaded piezoelectric plate was used.

Results: The dynamics of changes in the probing signal depending on the moment of supply of a correctly formed compensating half-cycle has been studied. A comparison was made of the shapes of the probing signals for the cases of the presence and absence of a damper on the back side of the plate. The possibility of obtaining signals of various durations is shown. It has been established that when a complex electrical signal is applied to the piezoelectric element of a damped probe, a probing signal is generated with a higher level of oscillations (with incomplete compensation) than for an undamped transducer.

Conclusion: A plate-type piezoelectric transducer is considered, designed to emit short probing signals, which is achieved by exciting it with electrical signals of complex shapes. The problem was solved by the d'Alembert method for a one-sided loaded piezoelectric plate. The aquatic environment was chosen as the acoustic load. The plate is considered in two versions – with and without a damper.

Keywords: piezoelectric transducer, damper, electrical compensation, pulse mode, d'Alembert method.

For citation: Study of the Pulsed Operating Mode of the Piezoelectric Transducer of an Immersion Flaw Detector / S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, V. M. Tsaplev, D. I. Polosukhina // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 5. P. 32–39. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-5-32-39.

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

Введение. Среди разнообразных методов неразрушающего контроля материалов и изделий особое место занимает акустический контроль, поскольку он имеет целый ряд достоинств, к которым можно отнести его относительную простоту, дешевизну, возможность применения при одностороннем доступе к образцу, безопасность для персонала и т. д. При этом важнейшие характеристики систем неразрушающего акустического контроля – это разрешающая способность к выявляемым дефектам и протяженность мертвой зоны. Снижение длительности зондирующего сигнала способствует улучшению названных характеристик. В связи с этим длительность излучаемого сигнала на выходе пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) должна быть максимально короткой (2–3 полупериода колебаний на частоте несущего сигнала).

Обеспечение малой длительности зондирующего сигнала наиболее часто достигается применением различных конструктивных методов, позволяющих расширять полосу пропускания ПЭП [1]–[12] (демпфирование чувствительного элемента, согласующие слои, подключение индуктивно-резистивных цепей к электрическому входу излучателя и т. д.). Вместе с тем, для получения малой длительности сигнала на выходе ПЭП существует и другой путь [1], [2], [13]–[15]. Он применим даже для узкополосных ПЭП. При этом с целью возбуждения активного элемента ПЭП используются электрические сигналы сложной формы. Физическая основа данного метода получения коротких сигналов довольно проста. Она состоит в том, что ПЭП возбуждается корот-

ким электрическим сигналом, часть которого (возбуждающая часть импульса) влечет за собой возникновение в преобразователе переходного процесса. Он может быть погашен за счет воздействия второй части сложного сигнала (компенсирующая часть импульса), подаваемого в нужный момент времени и тоже создающего переходный процесс. Эти два переходных процесса могут скомпенсировать друг друга. В результате ПЭП излучает только короткий зондирующий сигнал. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования указанного режима работы ПЭП для случая недемпфированной пьезопластины при нагрузке ПЭП на жидкие среды представлены, например, в [13], [14], [16] для режима излучения и в [15] – для режимов излучения и излучения-приема. В указанных работах при проведении расчетно-теоретических исследований применялся метод Даламбера (второе название – метод последовательных отражений). Он удобен для применения в качестве математического инструмента для исследования импульсных режимов работы ПЭП.

Представляет интерес проведение методом Даламбера исследования импульсного режима работы иммерсионного ПЭП в более широких пределах, чем это было сделано в предшествующих публикациях, а также осуществления этого для случая, при котором чувствительным элементом преобразователя служит пьезопластина, имеющая с тыльной стороны демпфирующий слой.

I. Постановка задачи. Задача исследования импульсного режима работы ПЭП решается в следующей постановке. Пьезокерамическая пластина (пусть это будет керамика ЦТСНВ-1) в ка-

честве акустической нагрузки имеет водную среду. Удельный акустический импеданс воды равен $z_{\text{в}} = 1.5 \cdot 10^6$ Па·с/м. Пластина имеет демпфер ($z_{\text{д}}$ – его удельный акустический импеданс). Решение задачи подразумевает определение формы зондирующих акустических сигналов, излучаемых ПЭП при различных значениях $z_{\text{д}}$, для случаев возбуждения чувствительного элемента электрическими сигналами сложной формы. Это может быть осуществлено методом Даламбера. Методика решения подробно описана в [13]. Как и в предшествующих публикациях, оценку длительности зондирующих сигналов будем осуществлять с помощью параметра T , представляющего безразмерное время $T = t/(T_0/2)$. Здесь использованы следующие обозначения: t – реаль-

ное (физическое) время, $T_0/2$ – полупериод колебаний на собственной частоте колебаний пластины. Такой подход дает возможность придать решаемой задаче наиболее общий характер, позволяющий отстроиться от значений частот, соответствующих конкретным толщинам пластины. В противном случае потребовалось бы для каждого значения собственной частоты пластины решать задачу заново. Применяемый же подход позволяет легко рассчитать длительность излучаемого акустического сигнала в зависимости от частоты (толщины пластины).

Для нумерации полупериодов переходного процесса целесообразно ввести параметр i . Возбуждающий и компенсирующий импульсы задаются в виде полупериодов синусоиды на частоте антирезонанса пластины. Понятно, что компенси-

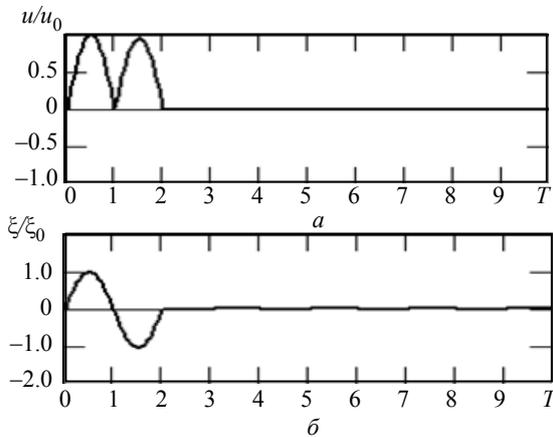


Рис. 1. Электрический сигнал, поступающий на пьезоэлемент (а), и зондирующий сигнал на выходе ПЭП (б) при $z_{\text{д}} = 0, n = 0$

Fig. 1. Electrical signal arriving at the piezo element (a) and probing signal at the PET output (б) at $z_{\text{д}} = 0, n = 0$

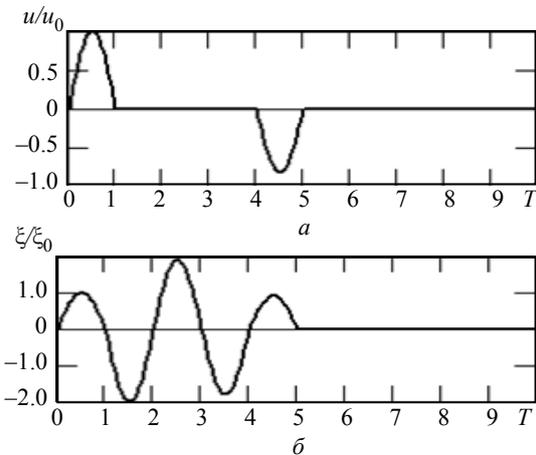


Рис. 3. Формы электрического сигнала на входе ПЭП (а) и зондирующий импульс (б) при $z_{\text{д}} = 0, n = 3$

Fig. 3. Shapes of the electrical signal at the PET input (a) and the probing pulse (б) at $z_{\text{д}} = 0, n = 3$

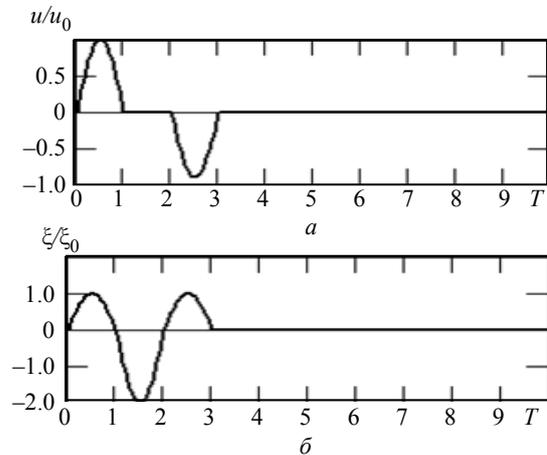


Рис. 2. Электрический импульс, возбуждающий ПЭП (а) и акустический сигнал (б) для случая $z_{\text{д}} = 0, n = 1$

Fig. 2. Electric pulse exciting the PET (a) and acoustic signal (б) at $z_{\text{д}} = 0, n = 1$

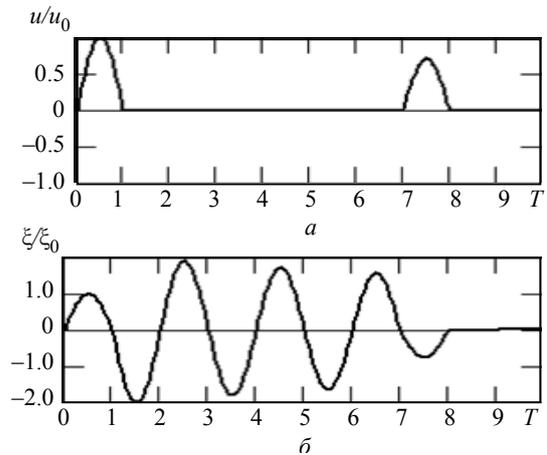


Рис. 4. Электрический сигнал на входе ПЭП (а) и акустический импульс на его выходе (б) для случая $z_{\text{д}} = 0, n = 6$

Fig. 4. Electrical signal at the PET input (a) and acoustic pulse its output (б) at $z_{\text{д}} = 0, n = 6$

рующие полупериоды могут существовать лишь при соблюдении условия $i \neq 0$. Введем также параметр n , соответствующий максимальному номеру полупериода до начала компенсации.

Далее представлены результаты изучения импульсного режима работы ПЭП, в котором в качестве активного элемента, возбуждаемого импульсами сложной формы, подразумевается применение демпфированной и недемпфированной пьезопластин.

II. Результаты численных исследований.

На рис. 1–4 представлены результаты, касающиеся работы ПЭП, основанного на использовании недемпфированной пьезопластины. К сожалению, ограниченный объем статьи не позволяет привести эти данные для широкого диапазона значений параметра n . Представлены лишь результаты для случая $z_d = 0$ при $n = 0$ (рис. 1), $n = 1$ (рис. 2), $n = 3$ (рис. 3) и $n = 6$ (рис. 4). На рис. 1, а – 4, а показаны временные зависимости форм электрических сигналов, поступающих на активный элемент ПЭП (T – безразмерное время; u/u_0 – электрическое напряжение u , нормированное к амплитуде возбуждающего полупериода u_0). Данная нормировка влечет за собой выполнение равенства $u/u_0 = 1$ для всех представленных возбуждающих полупериодов электрического сигнала. Компенсирующие полупериоды могут быть охарактеризованы следующими максимальными значениями амплитуд: $u/u_0 = 0.952$ (рис. 1, а), $u/u_0 = -0.905$ (рис. 2, а), $u/u_0 = -0.819$ (рис. 3, а) и $u/u_0 = 0.705$ (рис. 4, а). Временные зависимости форм излучаемых сигналов приведены на рис. 1, б – 4, б. Здесь по-прежнему T – безразмерное время. Значения смещений ξ представлены в нормированном виде ξ/ξ_0 (ξ_0 – амплитуда нулевого полупериода).

Анализ расчетных данных, представленных на рис. 1–4, позволяет утверждать, что применение импульсов сложной формы, возбуждающих ПЭП в виде недемпфированной пьезопластины, дает возможность получать зондирующие акустические сигналы малой длительности. Так, получение импульса длительностью в два полупе-

риода достигается при $n = 0$ (рис. 1); при $n = 1$ (рис. 2) – три полупериода; при $n = 3$ (рис. 3) и $n = 6$ (рис. 4) – пять и восемь полупериодов соответственно. Варьирование параметра n позволяет изменять длительность излучаемых сигналов в широких пределах.

В табл. 1 представлены данные, отражающие значения нормированной амплитуды компенсирующего импульса для широкого диапазона значений параметра n . Можно видеть, что значения u/u_0 положительны для $n = 0, 2, 4, 6$ и т. д. и отрицательны для $n = 1, 3, 5$ и т. д. Анализ расчетных результатов, полученных для широкого диапазона значений параметра n , показал, что при $n = 1, 3, 5, \dots$ можно говорить о полной компенсации переходного процесса. Неполная компенсация наблюдается при $n = 0, 2, 4, 6, \dots$. Так, например, при $n = 0$ амплитуды полупериодов акустического импульса имеют значения $\xi/\xi_0 = 1; -1.05; 0; 0.0045; 0; 0.0041; 0; 0.0037; 0; 0.0034; \dots$. Можно видеть, что после завершения основной части акустического сигнала, т. е. в «хвосте» импульса, амплитуды полупериодов чрезвычайно малы. Данное обстоятельство позволяет пренебречь ими. Аналогичная картина наблюдается и при других значениях n из диапазона $n = 0, 2, 4, 6, \dots$.

Перейдем к рассмотрению результатов расчета для случая демпфированной пьезопластины. На рис. 5–8 показаны формы электрических сигналов, возбуждающих демпфированную пьезопластину ($z_d = 9 \cdot 10^6$ Па · с/м). При этом рис. 5 соответствует случаю $n = 0$, рис. 6 – случаю $n = 1$, рис. 7 – $n = 3$, рис. 8 – $n = 6$. Сравнивая попарно рис. 1 и 5, рис. 2 и 6, рис. 3 и 7, рис. 4 и 8, можно установить, что демпфирование пластины не дает существенных различий в формах возбуждающих электрических сигналов по сравнению со случаем, при котором $z_d = 0$. Основные тенденции трансформации формы компенсирующего полупериода сохраняются. Изменение происходит лишь в их амплитудах, нормированных к амплитуде возбуждающего полупериода u/u_0 . Они становятся меньше. То же относится и к форме зондирующих сигналов ξ/ξ_0 .

Табл. 1. Зависимость нормированной амплитуды компенсирующего импульса от значений параметра n для случая недемпфированной пластины
 Tab. 1. Dependence of the normalized amplitude of the compensating pulse on the values of the parameter n for the case of a non-damped plate

n	0	1	2	3	4	5	6
u/u_0	0.952	-0.905	0.862	-0.819	0.780	-0.741	0.705

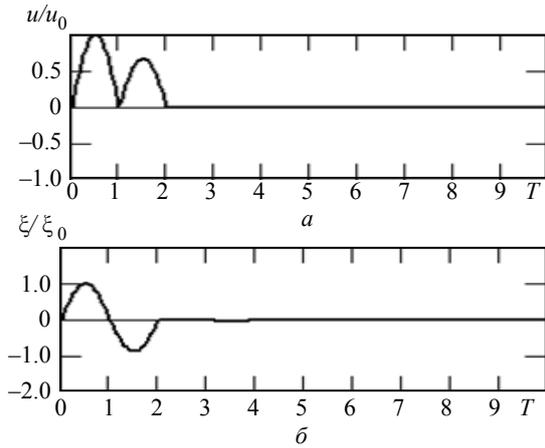


Рис. 5. Электрический сигнал, возбуждающий ПЭП (а), и зондирующий сигнал на его выходе (б) при $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$, $n = 0$

Fig. 5. Electrical signal that excites the PET (a) and the probing signal at its output (b) at $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$, $n = 0$

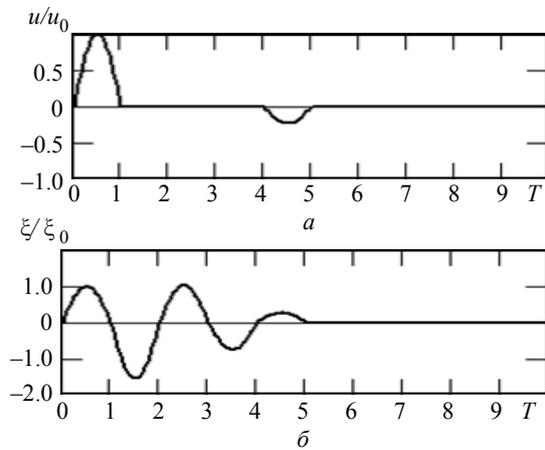


Рис. 7. Электрический сигнала на входе ПЭП (а) и зондирующий импульс (б) при $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$, $n = 3$

Fig. 7. Electrical signal at the PET input (a) and probing pulse (b) at $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$, $n = 3$

В табл. 2 представлены некоторые расчетные результаты, позволяющие оценить значения u/u_0 для различных z_d при изменении параметра n в пределах от 0 до 6.

Из данных, представленных в табл. 2, можно видеть, что, как и в случае недемпфированной пьезопластины, при $n = 0, 2, 4, 6$ значения u/u_0 положительны. Отрицательные значения они принимают при $n = 1, 3, 5$. Также можно отметить, что полная компенсация переходного процесса наблюдается при $n = 1, 3, 5, \dots$. Неполная компенсация соответствует случаям, при которых $n = 0, 2, 4, 6, \dots$. Кроме того, при демпфировании пластины можно наблюдать более высокие уровни осцилляций амплитуды в «хвостовой» части зондирующих акустических импульсов. Так, например, для $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ при $n = 0$ (рис. 5)

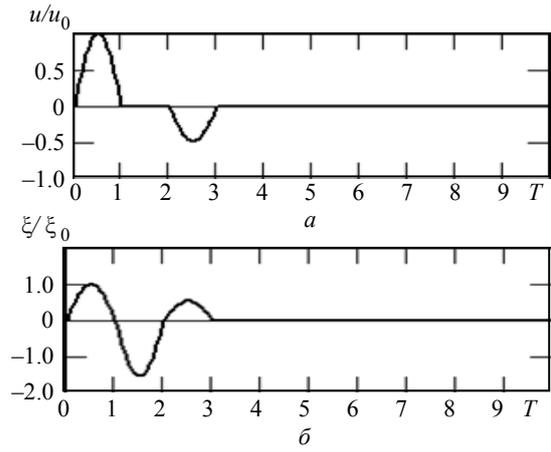


Рис. 6. Возбуждающий электрический импульс (а) и акустический сигнал (б) при $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$, $n = 1$

Fig. 6. Exciting electric pulse (a) and acoustic signal (b) at $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$, $n = 1$

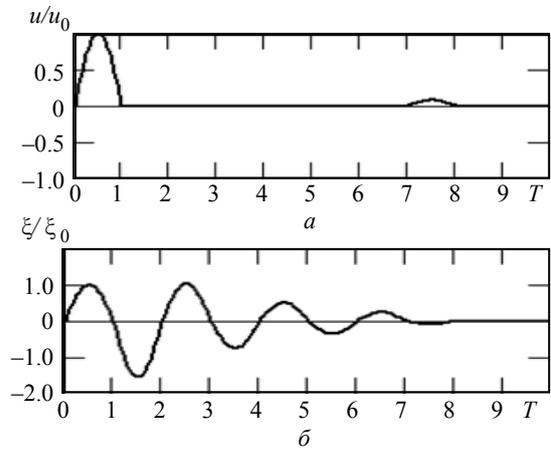


Рис. 8. Электрический сигнал на входе ПЭП (а) и акустический сигнал на его выходе (б) при $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$, $n = 6$

Fig. 8. Electrical signal at the PET input (a) and acoustic signal at its output (b) at $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s/m}$, $n = 6$

акустический сигнал на выходе ПЭП может быть охарактеризован следующими значениями ξ/ξ_0 : 1; -0.872; 0; -0.067; 0; -0.032; 0; -0.016; 0; -0.0076; После окончания основной части импульса максимальным из представленного ряда значений становится $\xi/\xi_0 = -0.067$. Оно составляет 6.7 % от амплитуды нулевого полупериода зондирующего сигнала. При $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$ и $n = 2$ максимальное значение амплитуды после окончания основной части импульса составляет 3.2 % от амплитуды нулевого полупериода. Столь невысокие значения осциллирующей амплитуд сигналов позволяют пренебречь эффектом неполной компенсации.

В конце стоит упомянуть, что степень демпфирования пластины, характеризуемой значением $z_d = 9 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с/м}$, выбрана максимальной из рассмотренных значений z_d не случайно. Такое z_d

Табл. 2. Зависимость u/u_0 от z_d и параметра n Tab. 2. Dependence u/u_0 on z_d and parameter n

Значения параметра n	Значения $z_d \cdot 10^{-6}$, Па · с/м			
	0	3	6	9
0	0.952	0.857	0.762	0.667
1	-0.905	-0.740	-0.603	-0.487
2	0.862	0.635	0.460	0.325
3	-0.819	-0.548	-0.364	-0.237
4	0.780	0.470	0.277	0.158
5	-0.741	-0.406	-0.219	-0.116
6	0.705	0.348	0.167	0.077

близко к максимальному значению, характерному для ПЭП, которые применяются при иммерсионном контроле. Это значение z_d относительно легко достижимо при использовании существующих технологий изготовления демпфера и, в то же время, позволяет получать акустические сигналы малой длительности.

Закключение. На основании применения метода Даламбера изучен импульсный режим работы иммерсионного пластинчатого пьезопреобразователя дефектоскопа при его возбуждении электрическими сигналами сложной формы. Исследована динамика изменения зондирующего сигнала в зависимости от момента подачи корректно сформированного компенсирующего полупериода. Проведено сравнение форм зондирующих сигналов для случаев присутствия и отсутствия демпфера на тыльной стороне пластины. Показана возможность получения сигналов различной длительности. Установлено, что при подаче сложного электрического сигнала на пьезоэлемент демпфированного ПЭП формируется зондирующий сигнал с более высоким уровнем осцилляций (при неполной компенсации) в «хвостовой» части импульса, чем для недемпфированного преобразователя.

Список литературы

1. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
2. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.
3. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Машиностроение, 1982. 157 с.
4. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
5. Physical acoustics / ed. by W. P. Mason and R. N. Thurston. Academic Press, Elsevier, 1979. Vol. 14, P. 277–406.
6. Radmanovich M. D., Mancic D. D. Designing and modeling of the power ultrasonic transducers / University of Nis. Nis, 2004. 198 p.
7. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2–4. New York: Springer Science+Business Media, 2007. 610 p.
8. Fabrication and characterization of transducers / E. P. Papadakis, C. G. Oakley, A. R. Selfridge, B. Maxfield // Physical Acoustics / Eds R. N. Thurston, A. D. Pierce, E. P. Papadakis. N.-Y., USA: Academic Press: 1999; Vol. 24. P. 43–134.
9. Prokic M. Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI, 2004. 266 p.
10. Kikuchi Y. Ultrasonic transducers. Tokyo: Corona Pub. Co., 1969. 407 p.
11. Uchino K. Advanced piezoelectric materials. Science and technology. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
12. Nakamura K. Ultrasonic transducers. Materials and design for sensors, actuators and medical applications. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
13. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. О возможности сокращения длительности переходного процесса в акустическом преобразователе при помощи компенсирующего электрического импульса // Дефектоскопия. 2014. № 7. С. 12–19.
14. Дианов Д. Б. О работе пьезопреобразователя в импульсном режиме // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 1968. Вып. 63. С. 114–126.
15. Уменьшение длительности импульса на выходе приемника при возбуждении излучателя сигналами сложной формы / Б. Ч. И, Р. С. Коновалов, С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко, И. Ю. Ошурков, В. М. Цаплев // Дефектоскопия. 2018. №1. С. 33–39.
16. Control of the duration of the transducer probe signal in diagnostic ultrasound devices / S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, V. M. Tsaplev, Z. M. Yuldashev, A. D. Solov'eva // Biomed. Engin. 2024. Vol. 57. P. 336–339.

Информация об авторах

Коновалов Сергей Ильич – д-р техн. наук, доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: sikonovlov.eut@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Коновалов Роман Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: rskonovalov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0155-2718>

Цаплев Валерий Михайлович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: valery@convergences-fr.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7386-7233>

Полосухина Дарья Игоревна – аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: polosuhinadi@mail.ru

Вклад авторов:

Коновалов С. И. – концепция и методология исследования; коррекция и редактирование рукописи.

Коновалов Р. С. – подготовка и проведение численных исследований; подготовка рукописи.

Цаплев В. М. – численный расчет и анализ данных; подготовка рукописи.

Полосухина Д. И. – численный расчет и анализ данных; подготовка рукописи.

References

1. Ul'trazvukovye preobrazovateli dlja nerazrushajushhego kontrolja / pod obshh. red. I. N. Ermolova. M.: Mashinostroenie, 1986. 280 s. (In Russ.).
2. Domarkas V. I., Kazhis R.-I. Ju. Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezoelektricheskie preobrazovateli. Vil'njus: Mintis, 1974. 256 s. (In Russ.).
3. Korolev M. V., Karpel'son A. E. Shirokopolosnye ul'trazvukovye p'ezopreobrazovateli. M.: Mashinostroenie, 1982. 157 s. (In Russ.).
4. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. Osobennosti impul'snyh rezhimov raboty jelektroakusticheskikh p'ezoelektricheskikh preobrazovatelej. SPb.: Politehnika, 2014. 294 s. (In Russ.).
5. Physical acoustics / ed. by W. P. Mason and R. N. Thurston. Academic Press, Elsevier, 1979. Vol. 14, P. 277–406.
6. Radmanovich M. D., Mancic D. D. Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis. Nis, 2004. 198 p.
7. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2–4. New York: Springer Science+Business Media, 2007. 610 p.
8. Fabrication and characterization of transducers / E. P. Papadakis, C. G. Oakley, A. R. Selfridge, B. Maxfield. In Physical Acoustics; Eds R. N. Thurston, A. D. Pierce, E. P. Papadakis. N.-Y., USA: Academic Press: 1999; Vol. 24. P. 43–134.
9. Prokic M. Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI, 2004. 266 p.
10. Kikuchi Y. Ultrasonic transducers. Tokyo: Corona Pub. Co., 1969. 407 p.
11. Uchino K. Advanced piezoelectric materials. Science and technology. 2nd ed. Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
12. Nakamura K. Ultrasonic transducers. Materials and design for sensors, actuators and medical applications. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
13. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. O vozmozhnosti sokrashhenija dlitel'nosti perehodnogo processa v akusticheskom preobrazovatele pri pomoshhi kompensirujushhego jelektricheskogo impul'sa // Defektoskopija. 2014. № 7. S. 12–19. (In Russ.).
14. Dianov D. B. O rabote p'ezopreobrazovatelja v impul'snom rezhime // Izv. SPbGJeTU «LjeTI». 1968. Vyp. 63. S. 114–126. (In Russ.).
15. Umen'shenie dlitel'nosti impul'sa na vyhode priemnika pri возбуждении излучателя сигналами сложной формы / B. Ch. I, R. S. Konovalov, S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko, I. Ju. Oshurkov, V. M. Caplev // Defektoskopija. 2018. № 1. С. 33–39. (In Russ.).
16. Control of the duration of the transducer probe signal in diagnostic ultrasound devices / S. I. Konovalov, R. S. Konovalov, V. M. Tsaplev, Z. M. Yuldashev, A. D. Solov'eva // Biomed. Engin. 2024. Vol. 57. P. 336–339.

Information about the authors

Sergey I. Konovalov – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Departments of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Roman S. Konovalov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Departments of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail rskonovalov@etu.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0155-2718>

Valery M. Tsaplev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail valery@convergences-fr.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7386-7233>

Daria I. Polosukhina – graduate student of the Departments of Electroacoustics and Ultrasound Technology of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail polosuhinadi@mail.ru

Contribution of the authors:

Konovalov S. I. – the concept and methodology of research; correction and editing of the manuscript.

Konovalov R. S. – preparation and conduct of numerical studies; preparation of the manuscript.

Tsaplev V. M. – numerical calculation and data analysis; preparation of the manuscript.

Polosukhina D. I. – numerical calculation and data analysis; preparation of the manuscript.

Статья поступила в редакцию 02.04.2024; принята к публикации после рецензирования 05.04.2024; опубликована онлайн 24.05.2024.

Submitted 02.04.2024; accepted 05.04.2024; published online 24.05.2024.
