

## **Теоретическое и экспериментальное исследование вопросов формирования короткого сигнала на выходе системы излучения-приёма**

Б.Ч. И, Р.С. Коновалов, С.И. Коновалов, А.Г. Кузьменко, В.М. Цаплев

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», 197376, ул. Проф. Попова 5, Санкт-Петербург, РФ. e-mail.: [sikonovalov.eut@gmail.com](mailto:sikonovalov.eut@gmail.com), Tel: +7 (812) 234-37-26, Fax: +7 (812) 234-37-26*

*Теоретически и экспериментально рассмотрен импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух идентичных пьезокерамических пластин, разделенных слоем иммерсионной жидкости (глицерина). В качестве электрического сигнала, подаваемого на излучатель, использовались сигналы сложной формы, состоящие из двух полупериодов синусоиды (возбуждающего и компенсирующего) на собственной частоте пьезопластины. Формы этих сигналов были определены в предшествующих работах авторов методом Даламбера. Оценивалась длительность электрического сигнала на выходе пьезоприемника. Задача теоретически решалась методом конечных элементов с помощью расчетной программы COMSOL. Проведено сравнительное исследование теоретических и экспериментальных результатов. Отмечено сходство форм расчетных сигналов на выходе системы при использовании методов Даламбера и конечных элементов с результатами экспериментального и натурального моделирования. Показано, что использование сигналов сложной формы позволяет добиться существенного снижения длительности импульса электрического напряжения на выходе приемника.*

*This paper theoretically and experimentally considers the pulsed mode of operation of the radiation-receiving system. The system contains two identical piezoceramic plates separated by a layer of immersion liquid (glycerin). The emitter was excited by the complex electrical signal of the special shape, which consisted of two half-cycles of the sine wave (exciting and compensating) on the natural frequency of the piezoplates. The forms of these signals were calculated by the authors and described in their previous papers using the d'Alembert method. The length of the electrical signal was estimated at the output of the piezoelectric receiver. The problem was solved theoretically using the finite element method. The acoustical system was simulated with the help of the COMSOL Multiphysics modeling environment. A comparative study of the theoretical and experimental results is carried out. The form of the signal at the output of the system was calculated by the d'Alembert method, and the simulated form by the finite element method was in good coincidence with the results of experimental and full-scale modeling. It is shown that the usage of complex waveforms allows achieving a significant pulse duration reduction of the electrical voltage at the output of the receiver.*

### **1. Введение**

В настоящее время акустические методы исследования внутренней структуры сред, материалов, изделий и полуфабрикатов получают все более широкое распространение. При этом необходимо отметить, что при всем разнообразии средств, применяемых для целей акустического неразрушающего контроля, общим для них является наличие конструктивных элементов – электроакустических преобразователей. В их задачу входит осуществление излучения и приема акустических сигналов, используемых для получения информации о нарушениях сплошности исследуемых объектов. В наши дни для этого широко применяются пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). На их основе реализуются различные варианты средств неразрушающего контроля, служащих для целей ультразвуковой дефектоскопии. В рамках одной работы не представляется возможным привести исчерпывающий список публикаций, посвященных теории работы ПЭП, их проектированию, технологии изготовления и измерения различных параметров. В качестве примера достаточно лишь сослаться хотя бы на некоторые из них [1–13].

Одной из многих разновидностей акустических методов контроля является иммерсионный контроль, характерной чертой которого является введение ультразвуковых сигналов в объект исследования через слой жидкости. В качестве иммерсионной среды могут использоваться вода, масло, глицерин и т.д. Излучение зондирующих сигналов и прием их (после прохождения исследуемого образца) может осуществляться с помощью двух ПЭП, вмонтированных, например, в стенки иммерсионной ванны.

Для успешного решения задач акустики, имеющих локационный характер, необходимо обеспечение возможностей создания короткого зондирующего сигнала, т.е. такого акустического импульса, который содержит всего лишь несколько полупериодов высокой частоты. Актуальность решения названной задачи объясняется возможностью получения улучшенных характеристик контрольно-измерительной аппаратуры, применяемой в ультразвуковой дефектоскопии (уменьшение мертвой зоны, повышение разрешающей способности и точности определения координат дефектов) и толщинометрии (особенно в случае чрезмерной малости толщины слоев по сравнению с пространственной протяженностью акустического сигнала). Для создания короткого сигнала традиционно используются широкополосные ПЭП, в которых для этого используются механическое демпфирование, согласующие слои, подключение электрических корректирующих цепей и др. Вместе с тем возможно получение коротких сигналов и с помощью узкополосных сигналов. Так, указанной цели можно добиться, подавая на преобразователь электрический сигнал сложной формы. Пусть, например, он состоит из двух полупериодов синусоиды на собственной частоте пьезопластины – возбуждающего и компенсирующего. Возбуждающий полупериод вызывает в ПЭП длительный переходный процесс. Компенсирующий полупериод с произвольной амплитудой действует на ПЭП аналогично. Если же заранее определить амплитуду компенсирующего полупериода для требуемого времени его подачи, то можно добиться полного отсутствия нежелательных колебаний преобразователя за счет компенсации одного переходного процесса другим. Методика расчета требуемых параметров компенсирующих полупериодов осуществлялась на основе применения метода Даламбера [18, 19]. При этом существенное внимание было уделено корректности применения этого метода для расчета импульсных режимов ПЭП [20], поскольку метод Даламбера подразумевает допущение о пренебрежении прямым пьезоэффектом. Полное сходство форм сигналов на выходе ПЭП, определенных методом Даламбера и методом эквивалентных схем в сочетании со спектральным методом Фурье (он подразумевает обязательный учет прямого пьезоэффекта) показало справедливость использования метода Даламбера. В [21] представлены некоторые теоретические и экспериментальные результаты возможности сокращения длительности сигнала на выходе приемника в системе излучения-приема. Настоящая работа посвящена продолжению начатых ранее исследований.

## **2. Экспериментальное исследование системы излучения-приема**

В работе [21] приведены результаты экспериментального исследования возможности получения импульса малой длительности на выходе системы излучения-приема. Кратко остановимся на достигнутых результатах.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, схема которой изображена на рис. 1. Она включала в себя излучающий 1 и приемный 2 пьезопреобразователи. Возбуждение излучателя осуществлялось генератором сигналов специальной формы Tabor Electronics WW2572A. Выходной сигнал с приемника анализировался с помощью осциллографа LECROY WaweAce 101. Формируемые генератором и фиксируемые осциллографом электрические сигналы обрабатывались в

цифровой форме на ЭВМ. В качестве иммерсионной жидкости использован глицерин 3 (плотность  $1260 \text{ кг/м}^3$ , скорость звука  $1920 \text{ м/с}$ ), что исключало возможность короткого замыкания. Параметры пьезопластин: рабочая частота –  $1 \text{ МГц}$ , диаметр  $20 \text{ мм}$ , толщина –  $1.25 \text{ мм}$ . Тыльные стороны пластин, размещенных в корпусах 4, были нагружены на воздух 5.

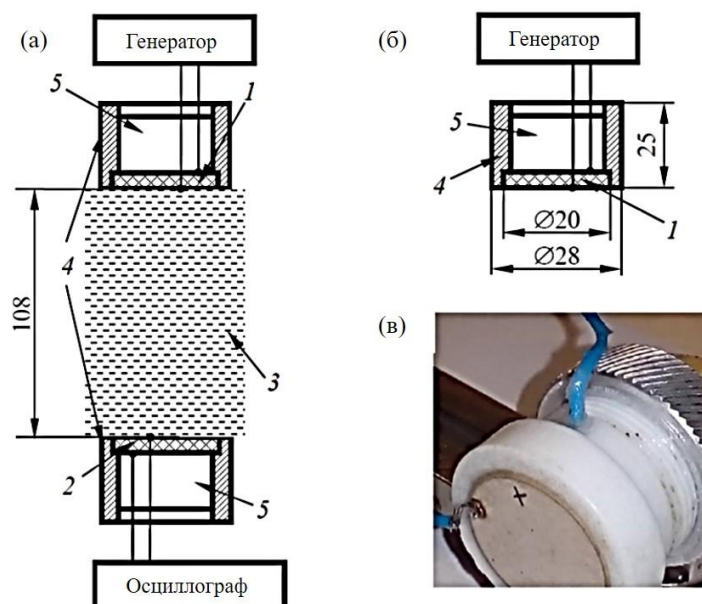


Рис.1. Схема экспериментальной установки: (а) схема установки, (б) схема излучающей пластины, (в) фото излучающей пластины.

На вход излучателя подавались электрические сигналы сложной формы, рассчитанные методом Даламбера на основе алгоритма, приведенного в работах [18,19]. Формы этих сигналов приведены на рис. 2. По оси абсцисс отложено безразмерное время  $T$ , которое определяется как  $T = t/(T_0/2)$ , где  $t$  – физическое (истинное) время,  $T_0$  – длительность периода колебаний на частоте антирезонанса пластины. По осям ординат отложено нормированное к амплитуде возбуждающего полупериода  $u_1$  электрическое напряжение  $u/u_1$ . На рис. 2а показан подаваемый на излучатель электрический сигнал, состоящий только из одного (возбуждающего) полупериода синусоиды. На рис. 2б–е показаны электрические импульсы сложной формы, предназначенные для подачи на излучающую пластину. Они содержат возбуждающий и компенсирующий полупериоды. Амплитуды возбуждающего полупериода, вследствие принятой нормировки, всегда равны 1, а амплитуды компенсирующих полупериодов составляют:  $0.926$  (рис. 2б);  $-0.852$  (рис. 2в);  $0.789$  (рис. 2г);  $-0.726$  (рис. 2д);  $0.672$  (рис. 2е).

Формы электрических сигналов на выходе системы излучения-приема в зависимости от сигналов, поступающих на вход излучателя, приводятся ниже в сравнении с результатами решения задачи методом конечных элементов.

### 3. Решение задачи методом конечных элементов

Использование аналитических методов для решения задачи получения сигналов малой длительности на выходе системы излучения-приема, например, метода последовательных отражений (метода Даламбера) [18,19], позволило получить

оценочные значения необходимых для этого амплитуд возбуждающего и компенсирующего полупериодов сигнала, подаваемого на излучатель.

### 3.1. Теоретические основы

Электрические и механические явления, происходящие в системе излучения–приема (механическое напряжение,  $u$ , механическое напряжени,  $\sigma$ , напряжённость электрического поля,  $E$ , and электрическое смещение,  $D$ ) могут быть описаны на основе уравнений прямого и обратного пьезоэффекта:

$$\left. \begin{aligned} u_i &= s_{ij}^E \sigma_j + d_{im} E_m \\ D_m &= d_{mi} \sigma_i + \varepsilon_{mk}^\sigma E_k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $s_{ij}^E$  упругая податливость в отсутствии электрического поля ( $E = 0$ ),

$\varepsilon_{mk}^\sigma$  диэлектрическая проницаемость в отсутствии механического напряжения ( $\sigma = 0$ )

$d_{mi}$  пьезоэлектрическая константа.

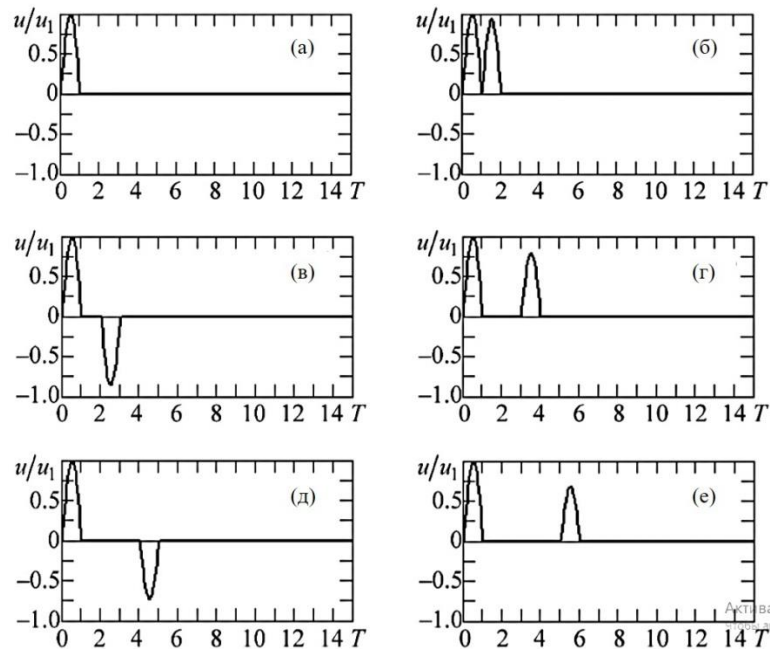


Рис. 2. Формы электрических сигналов, возбуждающих излучающую пьезопластину.

Вместе с тем процесс распространения акустических волн должен подчиняться волновому уравнению:

$$\frac{1}{c} \frac{d^2 p}{dt^2} = \nabla(-\nabla p), \quad (2)$$

где  $p$  – давление в жидкости,

$\nabla$  – гамильтониан,

$c$  – скорость звука в среде.

Передача механических смещений и напряжений из излучающего пьезоэлемента в среду и из среды в приемный пьезоэлемент описывается граничным условием, заключающимся в непрерывности нормальной составляющей ускорения на границах раздела:

$$\mathbf{n}(-\nabla p) = \mathbf{n} \frac{d^2 \xi}{dt^2} \quad (3)$$

где  $\mathbf{n}$  – нормаль к границе раздела сред,  
 $\xi$  – механическое смещение.

### 3.2. Параметры модели

Разработанная в COMSOL модель по своим геометрическим параметрам полностью повторяет условия эксперимента. Так, на рис. 3 представлена геометрическая модель, ось ординат которой совпадает с осью, соединяющей центры излучающей и приемной пьезопластин, а ось абсцисс – радиус ( $r$ ) данной осесимметричной модели. Излучающая пьезопластина 1 нагружена одной стороной на глицерин и возбуждается электрическим импульсом сложной формы (рис. 2). Формируемый акустический импульс, пройдя сквозь глицерин 3, попадает на приемную пьезопластину 2. Пьезопластины жёстко закреплены по краям. Частота электрических импульсов возбуждения равна 1 МГц, толщина пьезопластин – 1.25 мм, диаметр – 20 мм. Пьезоэлементы расположены соосно на расстоянии 108 мм друг от друга. Материал пьезоэлементов – пьезокерамика ЦТС-19.

Метод конечных элементов применим только для моделей конечных геометрических размеров. Вследствие расхождения ультразвукового пучка, возможны переотражения от границ глицеринового слоя 3. С целью исключения переотражений, в расчетной модели используется идеально согласованный слой 4, который без отражения пропускает волны, падающие в него из других зон и не отражает их обратно [22].

Разбиение исследуемой области на подобласти  $dx$  (рис. 3б), осуществлялось на основе следующего критерия:

$$dx = \lambda/16,$$

где  $\lambda$  – длина волны в глицерине.

Временной шаг  $dt$  выбирался, исходя из критерия Куранта-Фридрихса-Леви (КФЛ), являющегося необходимым условием стабильности численного решения дифференциального уравнения [23].

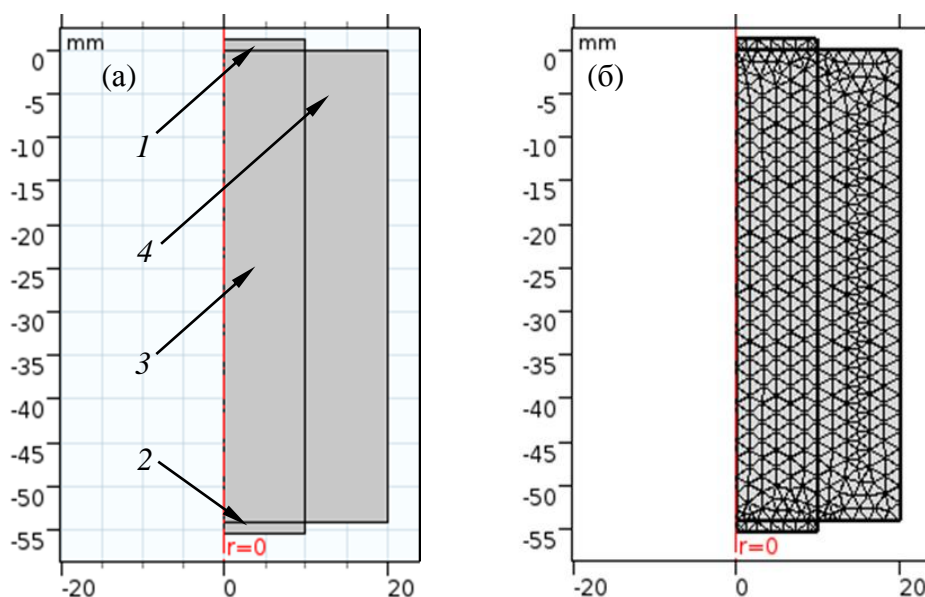


Рис. 3. Исследуемая геометрическая область в среде COMSOL.

Для двумерного случая данный критерий выглядит следующим образом:

$$c_x \frac{dt}{dx} + c_y \frac{dt}{dy} < CFL, \quad (5)$$

где  $c_x, c_y$  – скорости звука в глицерине относительно координатных осей  $x$  и  $y$  соответственно;

$dx, dy$  – шаги по координатным осям  $x$  и  $y$ .

Поскольку глицерин – материал линейно изотропный, то  $dx = dy$ ,  $c_x = c_y = c$ ,  $CFL = 1$ . Тогда уравнение (5) можно переписать в следующем виде

$$2c \frac{dt}{dx} \leq 1 \text{ или } dt \leq \frac{dx}{2c}.$$

В результате, учитывая, что  $dx = \lambda/16$ , а  $c = \lambda f$ , где  $f$  – частота возбуждения излучателя, критерий выбора временного шага примет вид:

$$dt \leq \frac{1}{32f}.$$

#### 4. Сравнение натуральных данных с результатами численного эксперимента

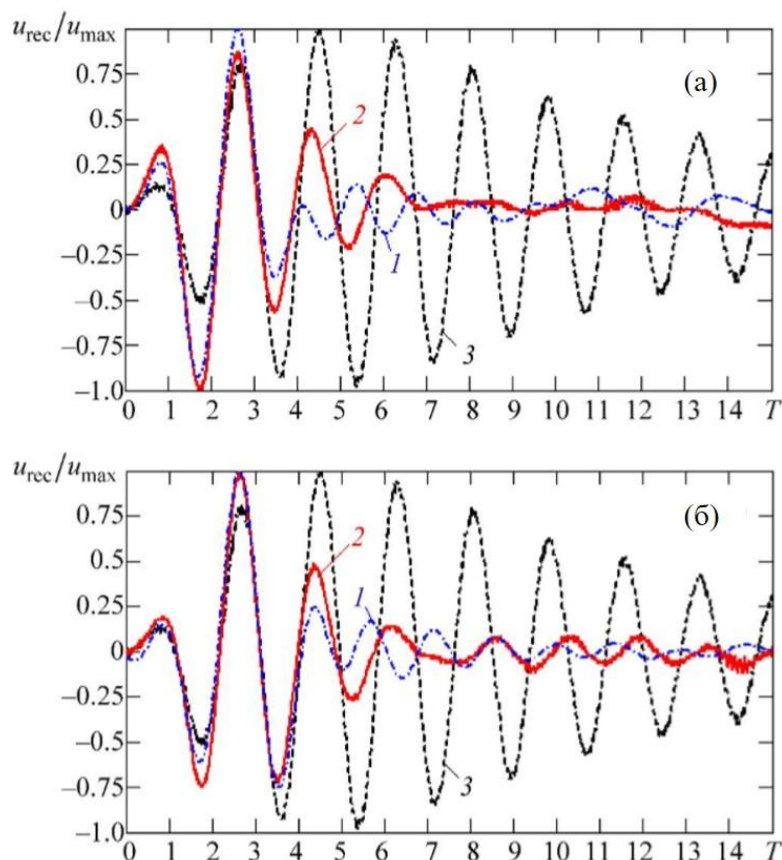
В работе [21] проведено сравнение форм расчетных электрических сигналов на выходе приемника, полученных применением метода Даламбера, с экспериментальными данными. Интерес представляет также сравнение экспериментальных данных с результатами расчета методом конечных элементов. В качестве характеристик для сравнения, как и в [21], будем использовать электрическое напряжение, снимаемое с приёмной пьезопластины. Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, в сочетании с данными, приведенными в [21], могут представить интерес для специалистов, занятых разработкой пьезопреобразователей предназначенных для решения задач прикладной акустики.

На рис. 4, в качестве примеров, приведены формы электрических сигналов на выходе приемника для случаев подачи на излучатель электрических импульсов, изображенных на рис. 2а–в. На рис. кривая 1 соответствует расчетным данным, полученным методом конечных элементов. Кривая 2 – экспериментальным данным. При этом на рис. 4а показаны результаты, относящиеся к случаю, при котором на излучатель поступает сигнал, изображенный на рис. 2б. На рис. 4б представлены результаты, соответствующие случаю, при котором на излучающую пьезопластину подается электрический импульс, показанный на рис. 2в. Кроме того, рис. 4а,б дополнительно содержат кривую под номером 3. Она соответствует сигналу, экспериментально определенному на выходе приемника при поступлении на излучатель импульса электрического напряжения, изображенного на рис. 2а. Все импульсы, представленные на рис. 4, нормированы к амплитуде максимума сигналов  $u_{\max}$  для каждого из принятых импульсов  $u_{\text{гес}}$ . Параметр  $u_{\text{гес}}/u_{\max}$ , полученный в результате нормировки, отложен по оси ординат. По оси абсцисс отложено безразмерное время  $T = t/(T_0/2)$ , где  $T_0 = 1$  мкс – длительность периода сигнала на собственной частоте пластины;  $t$  – физическое (истинное) время.

Анализ материалов, представленных на рис. 4, свидетельствует о том, что кривые 1 и 2 очень близки. При этом основные части импульсов практически полностью совпадают, некоторые расхождения наблюдаются лишь в заключительной («хвостовой») части сигнала. Видно, что длительность сигнала на выходе приемника в эксперименте (кривая 2) и при численных расчетах (кривая 1) сильно сокращается в сравнении с сигналом соответствующим кривой 3. Так, например, для случая,



представленного на fig. 5а, она сокращается с 27 до 11 полупериодов (по уровню  $-20$  dB от максимума).



**Рис.4. Формы выходных электрических импульсов.**

Стоит отметить, что «хвосты» импульсов на кривых 1 и 2 имеют частотные искажения по сравнению с основной (начальной) частью импульсов. Данный факт можно объяснить влиянием компенсирующего полупериода сигнала, поступающего на излучатель.

### **Заключение**

Таким образом, в работе численно и экспериментально изучен импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух идентичных пьезокерамических пластин. В качестве иммерсионной жидкости выбран глицерин. Экспериментально подтверждено, что возбуждение излучателя сложным электрическим сигналом, форма которого определена расчетно-теоретическим путем, позволяет снизить длительность сигнала на выходе приемника. Проведено сравнение длительностей выходных сигналов с приемника для случая возбуждения излучателя сигналом в виде одного полупериода синусоиды на собственной частоте излучающей пластины и ряда конкретных видов сигналов сложной формы. Отмечено сходство форм расчетных и экспериментальных сигналов на выходе системы.

*Работа выполнена в рамках Гранта Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-4165.2018.8).*

## Литература

1. Berlincourt D. A., Curran D. R., Jaffe H. Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers. In Physical Acoustics. Principles and Methods; W. P. Mason, Ed.; Academic Press: N.-Y., USA, 1964; Vol. 1A, pp. 169–270. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781483228570500095>  
<https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-2857-0.50009-5>
2. Wolfgang Sachse, Nelson N. Hsu. Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization. In Physical Acoustics; W. P. Mason, R. N. Thurston, Eds.; Academic Press: N.-Y., USA, 1979; Ch. 4, Vol. 14, pp. 277–406. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124779143500098>  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-477914-3.50009-8>
3. Milan D. Radmanovich, Dragan D. Mancic. Designing and modeling of the power ultrasonic transducers. University of Nis: Faculty of Electronics, 2004. 198 p. -Режим доступа: <http://alejandria.ccm.itesm.mx/biblioteca/digital/liele/dtpput.pdf>
4. Sherman C. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. Ch. 2–4. New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2007. 610 p. -Режим доступа: <https://www.springer.com/gp/book/9781441921987>
5. Emmanuel P. Papadakis, Clyde G. Oakley, Alan R. Selfridge, Bruce Maxfield. Fabrication and characterization of transducers. In Physical Acoustics; R. N. Thurston, Allan D. Pierce, Emmanuel P. Papadakis, Eds.; Academic Press: N.-Y., USA, 1999; Vol. 24. P. 43–134. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893388X99800244>
6. Smith Warren. Measuring the Electrical Characteristics of Piezoelectric Devices. Ultrasonic Measurement Methods. In Physical Acoustics; R. N. Thurston, Allan D. Pierce, Eds.; Academic Press: N.-Y., USA, 1990; Vol. 19. P. 267–290. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124779198500121>
7. Prokic M. Piezoelectric transducers modeling and characterization. Switzerland: MPI, 2004. 266 p. -Режим доступа: <http://alejandria.ccm.itesm.mx/biblioteca/digital/liele/pcmc.pdf>
8. Ultrasonic transducers / ed. by Yoshimitsu Kikuchi / Tokyo: Corona Pub. Co., 1969. – 407 p.
9. Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology, 2nd ed.; K. Uchino. Ed.; Woodhead Publishing, 2017. – 830 p. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081021354099872>  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102135-4.09987-2>
10. Ultrasonic Transducers. Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications; K. Nakamura, Ed.; Woodhead Publishing, 2012. – 722 p. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/book/9781845699895>
11. Warren P. Mason. Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics; D. Van Nostrand Company, Inc.: N.-Y., USA, 1950 – 508 p. -Режим доступа: <https://archive.org/details/piezoelectriccry00maso>
12. Ul'trazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya (Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Nondestructive Testing) [in Russian]; Ermolov, I.N., Ed.; Mashinostroenie: Moscow, USSR, 1986. – 280 p.
13. Domarkas V.I., Kazhis R.-I. Yu., Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezoelektricheskie preobrazovateli (Verification and Measurement Piezoelectric Transducers) [in Russian]; Mintis: Vilnius, USSR, 1974. – 256 p.
14. Keskyula A.Yu., Methods of increasing wideband acoustic section of flaw detectors. Soviet Journal of Nondestructive Testing, 1975, Vol. 11, №3, pp. 50–61.



15. Gitis M. B. Transducers for pulsed ultrasonic flaw detection - Fundamental theoretical aspects. Soviet Journal of Nondestructive Testing, 1981, Vol. 17, №2, pp. 131–145. -Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/253702177\\_Transducers\\_for\\_pulsed\\_ultrasonic\\_flaw\\_detection\\_-\\_Fundamental\\_theoretical\\_aspects\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/253702177_Transducers_for_pulsed_ultrasonic_flaw_detection_-_Fundamental_theoretical_aspects_Review)
16. Korolev M.V., Karpel'son, A.E. Shirokopolosnye ul'trazvukovye p'ezopreobrazovateli (Wideband Ultrasonic Piezoelectric Transducers) [in Russian]; Mashinostroenie: Moscow, USSR, 1982. – 157 p.
17. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. Osobennosti impul'snykh rezhimov raboty elektroakusticheskikh p'ezoelektricheskikh preobrazovatelei (Peculiarities of Pulsed Operating Modes of Electroacoustic Piezoelectric Transducers) [in Russian]; Politehnika: St. Petersburg, Russia, 2014. – 294 p. -Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=25146021>  
<https://sites.google.com/site/sikonovalov/publikacii/naucnye-stati/Binder1.djvu?attredirects=0&revision=1>
18. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. On the Possibility of Reducing the Duration of a Transient Process in an Acoustic Transducer Using a Compensating Electric Pulse. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, Vol. 50, №7, pp. 385–391. -Режим доступа: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1061830914070067>  
DOI: 10.1134/S1061830914070067
19. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. Generating short pulses at the output of an emission-reception system when the emitter is excited with pulses with a special shape. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2016, Vol. 52, №4, pp. 218–226. -Режим доступа: <http://link.springer.com/article/10.1134/S1061830916040057>  
DOI: 10.1134/S1061830916040057
20. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. On the allowance for direct piezoelectric effect when studying the pulsed operation mode of a piezoelectric emitter by d'Alembert's method. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2017, Vol. 53, №4, pp. 286–294. -Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1061830917040040>  
DOI: 10.1134/S1061830917040040
21. B. Ch. Ee, R. S. Konovalov, S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko, I. Yu. Oshurkov, V. M. Tsaplev. Decreasing pulse duration at receiver output under emitter excitation with complex waveforms. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2018, Vol. 54, №1, pp. 31–36. -Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1061830918010035>  
DOI: 10.1134/S1061830918010035
22. Berenger J. P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. Journal of Computational Physics, 1994, Vol. 114, Is. 2, pp. 185–200. -Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999184711594>  
<https://doi.org/10.1006/jcph.1994.1159>
23. Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik. Mathematische Annalen, 1928, Vol. 100, pp. 32–74. -Режим доступа: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01448839.pdf>