

Формирование зондирующих сигналов пьезоэлектрических преобразователей для ультразвукового контроля

С. И. Коновалов✉, З. М. Юлдашев

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

✉ sikonovalov.eut@gmail.com

Аннотация

Введение. Сокращение длительности зондирующего импульса на выходе многослойного излучателя является актуальной задачей акустического неразрушающего контроля, поскольку способствует улучшению разрешающей способности системы, точности определения координат дефектов и снижению протяженности мертвой зоны. Наиболее распространенным методом достижения малой длительности сигнала является механическое демпфирование. Применение с этой целью RL -цепей, подключаемых к электрической стороне пьезопреобразователя (ПЭП), изучено в меньшей мере. Интерес представляет сравнительное исследование потенциальных возможностей двух указанных способов получения короткого сигнала.

Цель работы. Проведение сравнительного исследования двух вариантов снижения длительности зондирующего сигнала с целью установления предпочтительности их применения в практике ультразвукового контроля.

Материалы и методы. Для определения границ предпочтительного применения одного из методов в сравнении с другим использован математический аппарат, основанный на использовании интегрального исчисления, а также численных методов расчета. При построении математической модели ПЭП применен метод схем-аналогов в сочетании со спектральным методом на основе преобразований Фурье. Численные расчеты выполнены в среде MathCad.

Результаты. Установлено, что применение электрической корректирующей цепи с оптимальными параметрами позволяет в широком диапазоне изменения значений удельного акустического сопротивления протектора добиваться меньшей длительности зондирующих сигналов на выходе ПЭП, чем в случае использования демпфированного ПЭП при значениях удельного акустического сопротивления демфера z_d , меньших

$10 \cdot 10^6$ Па·с/м. При $z_d > 10 \cdot 10^6$ Па·с/м предпочтение стоит отдавать механическому демпфированию пьезоэлемента. Установлено, что амплитуда сигналов на выходе ПЭП с подключенной к нему корректирующей цепью превышает амплитуду сигнала при осуществлении демпфирования пьезоэлемента.

Заключение. Полученные результаты позволяют априорно оценивать и сравнивать между собой возможности ПЭП при использовании двух методов создания короткого зондирующего сигнала, а также обоснованно выбирать материалы для создания протектора в широком диапазоне удельных акустических сопротивлений. Корректный выбор параметров конструктивных элементов ПЭП дает возможность улучшения разрешающей способности систем излучения-приема, снижения протяженности мертвой зоны и повышения точности определения координат дефектов, что, в итоге, способствует повышению качества акустического контроля материалов и изделий.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, пьезопреобразователь, пьезопластина, электрическая корректирующая цепь, демпфер, контактный слой

Для цитирования: Коновалов С. И., Юлдашев З. М. Формирование зондирующих сигналов пьезоэлектрических преобразователей для ультразвукового контроля // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 1. С. 87–98. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-87-98

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-22-20014) и Санкт-Петербургского научного фонда (соглашение № 16/2022 от 14.04.2022).

Статья поступила в редакцию 27.11.2022; принята к публикации после рецензирования 29.12.2022; опубликована онлайн 28.02.2023



Formation of Probing Signals of Piezoelectric Transducers for Ultrasonic Testing

Sergey I. Konovalov✉, Zafar M. Yuldashev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ sikonovalov.eut@gmail.com

Abstract

Introduction. Reducing the duration of the probing pulse at the output of a multilayer radiator is an urgent task of acoustic non-destructive testing. This not only improves the resolution of the system and the accuracy of determining the coordinates of defects, but also reduces the length of the dead zone. The most versatile method for achieving short signal duration is mechanical damping. The use of RL circuits connected to the electrical side of a piezoelectric transducer (PET) for this purpose has been studied to a lesser extent. Of interest is a comparative study of the potential possibilities of the two indicated methods for obtaining a short signal.

Aim. To carry out a comparative study of two options for reducing the duration of the probing signal in order to establish their preferential use in the practice of ultrasonic testing.

Materials and methods. To determine the boundaries of the preferred application of one of the methods in comparison with the other, a mathematical apparatus is used based on the use of integral calculus, as well as numerical calculation methods. When constructing a mathematical model of piezoelectric transducers operating in a pulsed mode, the method of analog circuits is used in combination with the spectral method based on Fourier transforms. Numerical calculations were performed in the MathCad environment.

Results. It was established that the use of an electrical corrective circuit with optimal parameters makes it possible, across a wide range of changes in the values of the specific acoustic resistance of the protector, to achieve a shorter duration of probing signals at the output of the probe than in the case of using a damped probe with values of the specific acoustic resistance of the damper z_d latitude $10 \cdot 10^6$ Pa·s/m. At $z_d > 10 \cdot 10^6$ Pa·s/m, preference should be given to mechanical damping of the piezoelectric element. It was found that the amplitude of the signals at the output of the PET with a corrective circuit connected thereto exceeds the amplitude of the signal when the piezoelectric element is damped.

Conclusion. The results obtained allow an a-priori evaluation and comparison of PET capabilities using two methods for creating a short probing signal, as well as a justified selection of materials for creating a protector across a wide range of specific acoustic resistances. The correctly selected parameters of the structural elements of the probe makes it possible to improve the resolution of radiation-reception systems, reduce the length of the dead zone, and increase the accuracy of determining the coordinates of defects. This ultimately improves the quality of acoustic testing of materials and products.

Keywords: ultrasonic testing, piezoelectric transducer, piezoplate, electric corrective circuit, damper, contact layer

For citation: Konovalov S. I., Yuldashev Z. M. Formation of Probing Signals of Piezoelectric Transducers for Ultrasonic Testing. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 1, pp. 87–98. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-1-87-98

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

Acknowledgements. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (grant no. 22-22-20014) and the St Petersburg Science Foundation (agreement no. 16/2022 of 04/14/2022).

Submitted 27.11.2022; accepted 29.12.2022; published online 28.02.2023

Введение. Конкурентоспособность промышленно развитых стран на мировом рынке производства и потребления продукции в настоящее время определяется не только ее валовым объемом и ассортиментом, но и ее качеством [1–3]. По данным [2] "затраты на контроль качества продукции

могут достигать 12...15 % в таких областях промышленности, как оборонная, атомная и аэрокосмическая, а в ракетостроении – даже 20 %. При этом упомянутые затраты очень быстро окупаются, поскольку применение неразрушающего контроля (НК) на всех этапах изготовления и приемки

производимой продукции радикально повышает ее качество".

В соответствии с ГОСТ Р 56542–2019 принято выделять 9 способов НК. Среди них методы акустических испытаний получили чрезвычайно широкое распространение, что связано с их достоинствами (точность определения дефектов; безопасность для здоровья человека; низкая стоимость проведения контроля; возможность оценки изделий из различных материалов; отсутствие повреждений при исследовании объекта; возможность использования без нарушения технологического процесса; возможность подхода к изделию с одной стороны и т. д.). Перечисленные достоинства ультразвуковой аппаратуры достигаются посредством постоянного улучшения ее характеристик. Несмотря на это, повышение требований к качеству материалов, изделий и полуфабрикатов диктует необходимость дальнейшего совершенствования средств акустического НК.

В настоящее время существует большое разнообразие различных видов акустического НК. Однако общим для всех них является наличие конструктивных элементов, предназначенных для излучения и приема акустических сигналов. Эти элементы называются преобразователями. Они могут строиться на различных физических принципах. В настоящее время наибольшее распространение получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Причиной этого является их более высокая чувствительность по сравнению с преобразователями других типов. В их задачу в режиме излучения входит преобразование энергии электрических сигналов, возбуждающих ПЭП, в энергию акустических зондирующих сигналов, излучаемых в исследуемую среду. В режиме приема преобразователи осуществляют обратное преобразование.

Создание средств НК, способных излучать зондирующие сигналы с заданными параметрами, позволяет решать задачу улучшения столь важных характеристик, как разрешающая способность к минимально выявляемым дефектам, размер мертвой зоны, точность определения координат дефектов. Достичь этого можно на основе применения импульсного режима работы преобразователей и систем излу-

чения-приема [4–14]. При этом под импульсным режимом понимается такой режим работы, при котором ПЭП способен излучать и принимать весьма короткие сигналы, длительность которых не превышает всего лишь нескольких полупериодов высокой частоты в импульсе. Пути улучшения упомянутых характеристик средств акустического НК являются:

1. Внесение конструктивных изменений в приемопередающие элементы (коррекция конструктивных параметров ПЭП), включая также и подсоединение корректирующих электрических цепей к электрической стороне ПЭП.

2. Формирование управляющих сигнальных воздействий на приемопередающие элементы (коррекция электрических сигналов, возбуждающих ПЭП).

Из изложенного следует, что разработка алгоритмов коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП, является базовым принципом и концепцией построения импульсных ПЭП и систем излучения-приема при создании систем ультразвукового контроля высокого разрешения.

В данной статье уделено внимание исследованию потенциальных возможностей создания коротких импульсных зондирующих сигналов за счет использования некоторых средств, относящихся к первому из названных путей. Так, например, представляет интерес сравнительное исследование возможности снижения длительности зондирующего сигнала на выходе ПЭП механическим демпфированием пьезоактивного элемента и подключением корректирующей RL -цепи к электрической стороне излучателя. Актуальность проведения данного исследования объясняется следующим. Механическое демпфирование является очень распространенным способом снижения длительности излучаемого зондирующего сигнала. Естественное увеличение степени демпфирования пьезоэлемента влечет за собой снижение не только длительности сигнала, но и его амплитуды. Это является недостатком указанного способа конструктивной коррекции ПЭП. В то же время, в литературе недостаточно внимания уделено исследованию импульсного режима работы широкополосных ПЭП с подключенными к ним электрическими цепями. Иногда

этот способ можно рассматривать как возможную альтернативу демпфированию активного элемента. Данным обстоятельством можно объяснить интерес проектировщиков ПЭП к определению диапазонов степеней демпфирования пьезоэлемента, при которых демпфированный ПЭП имеет преимущества или недостатки (с точки зрения длительностей и амплитуд зондирующих сигналов) по сравнению с преобразователем, к электрической стороне которого подключена корректирующая RL -цепь.

Приступая к решению обозначенной проблемы, следует отметить важное обстоятельство. Необходимо различать две задачи – исследование возможности расширения полосы пропускания ПЭП и исследование импульсного режима работы ПЭП. Первая задача, связанная с анализом влияния на амплитудно-частотную характеристику преобразователя ряда его конструктивных параметров, решается для гармонического режима. Результаты ее решения для варианта применения длинных импульсов могут распространяться на случаи работы ПЭП в системах излучения-приема. Для ПЭП, работающих в импульсном режиме, довольно часто требуется расширенная полоса пропускания. Это связано с тем, что преобразователь в этом случае возбуждается коротким электрическим сигналом, имеющим широкий спектр. Недостаточная полоса пропускания приводит к обрезанию ряда спектральных составляющих, в результате чего зондирующий сигнал затягивается, в нем появляются искажения, по своей форме напоминающие биения, регулярность акустического сигнала нарушается. Для успешности работы ПЭП в импульсном режиме необходимо применять меры, позволяющие увеличивать полосу пропускания. Однако исследования, направленные на решение этой задачи, проводятся исключительно в непрерывном режиме. В этом случае отсутствует возможность изучения длительности и амплитуды излучаемого сигнала. Решение второй задачи, позволяющей проводить подобные исследования, должно осуществляться методами, с помощью которых можно проанализировать нестационарный режим работы ПЭП. Только такой подход позволяет исследовать динамику изменения переходных процессов, происходящих в преоб-

разователе, отслеживать трансформацию формы зондирующих сигналов, т. е. изучать особенности импульсного режима работы ПЭП. Иными словами, недопустимо смешивать две задачи, названные ранее. Они являются совершенно самостоятельными.

Постановка задачи. На рис. 1 приведено схематичное изображение излучающего ПЭП, предназначенного для исследования внутренней структуры твердой среды. Преобразователь представляет собой многослойную структуру. Активный элемент (пьезопластина) через систему переходных слоев нагружен на рабочую среду. В качестве активного материала выбрана пьезокерамика ЦТСНВ-1, рабочая среда – сталь. Исследуемый ПЭП может рассматриваться в двух вариантах:

1. К электрической стороне ПЭП, последовательно с ним, подключена электрическая цепь в виде последовательного соединения индуктивности L и резистора R . При этом пьезоэлемент не имеет демпфера. Этот вариант рассмотрения задачи соответствует наличию на рис. 1 модуля 1 (модуль 1 представляет собой электрическую RL -цепь) и отсутствию модуля 2 (модуль 2 конструктивно представляет собой демпфер).

2. ПЭП является демпфированным (в данном случае в конструкции преобразователя присутствует модуль 2), Электрическая корректирующая цепь (модуль 1) отсутствует.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: $z_H, z_1, z_2, z_3, z_K, z_D$ – удельные акустические сопротивления среды (акустической нагрузки),

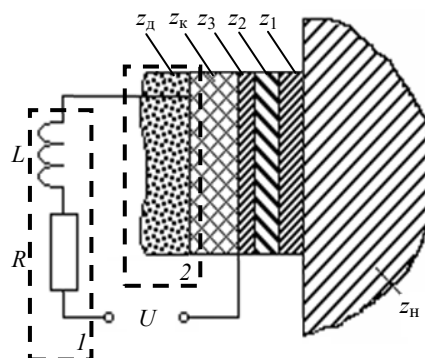


Рис. 1. Схематичное представление ПЭП в двух вариантах работы

Fig. 1. Schematic representation of the PET in two versions of work

внешнего контактного слоя, протектора, внутреннего контактного слоя, пьезокерамики и демпфера соответственно. ПЭП возбуждается импульсом электрического напряжения U . Будем предполагать, что внутреннее сопротивление генератора, вырабатывающего импульс электрического напряжения U , поступающего на пьезопластину, равно нулю.

Стоит пояснить назначение системы переходных слоев "внутренний контактный слой–протектор–внешний контактный слой", через которые пьезоэлемент излучает сигнал в исследуемую среду. Протектор предназначен для предохранения поверхности излучающего элемента от механического разрушения при сканировании преобразователем поверхности исследуемого изделия. Совершенно очевидно, что между излучающей поверхностью пластины и протектором, а также между другой стороной протектора и объектом контроля должен находиться слой материала, в задачу которого входит создание надежного акустического контакта. В качестве такого материала могут использоваться различные вещества. В частности, внутренний слой может представлять собой тонкий слой клея или легкоплавкого припоя, который позволяет создать контакт протектора и пьезоматериала. Ряд конструктивных решений подразумевает вообще отсутствие внутреннего контактного слоя. В этом случае протектор выполняется из материалов, которые наносятся непосредственно на поверхность пьезоэлемента. После этого они полимеризуются и шлифуются после отверждения до требуемой толщины. В этом случае в материал, служащий связующим звеном, вводится мелкодисперсный порошок твердых материалов для недопущения истирания протектора. Ряд конструкций ПЭП предполагают съемную систему "внутренний контактный слой–протектор–внешний контактный слой". В таком варианте в качестве внутреннего и внешнего контактных слоев часто используются жидкости (вода, масло, глицерин и т. д.). В описываемой работе подразумевается именно такой вариант реализации системы переходных слоев. В таких случаях выставляется определенный (малый) волновой размер внутреннего контактного слоя, контроль толщины которого досту-

пен в процессе работы ПЭП. Волновой размер внешнего контактного слоя может быть различным, поскольку он зависит от состояния поверхности объекта контроля.

Введем ряд параметров для характеристики обоих типов рассматриваемых излучателей. Пусть

$$\alpha_1 = x_1/x; \alpha_2 = x_2/x; \alpha_3 = x_3/x,$$

где x – волновая толщина керамики; x_1 ; x_2 ; x_3 – волновые толщины наружного контактного слоя, протектора и внутреннего контактного слоя соответственно. Введенные параметры позволяют задавать волновые толщины каждого из рассматриваемых конструктивных слоев в виде некоторой определенной части от волновой толщины пьезокерамики.

Для того чтобы охарактеризовать излучатель, соответствующий варианту 1 (ПЭП, не имеющий демпфера, но содержащий последовательную RL -цепь, подключенную последовательно с ним), дополнительно введем некоторые параметры:

$$\omega_{эл} = \frac{1}{\sqrt{LC_0}}; n = \omega_{эл}/\omega_0; Q = \omega_0 L/R,$$

где $\omega_{эл}$ – резонансная частота электрического контура, который образован индуктивностью L и собственной емкостью пластины C_0 ; C_0 – электрическая емкость заторможенной пластины; n – относительная резонансная частота электрического контура; ω_0 – антирезонансная частота пластины; Q – электрическая добротность контура.

Далее для решения задачи необходимо задаться формой импульса электрического сигнала, возбуждающего преобразователь.

Решение задачи сводится к определению формы импульса колебательной скорости, излучаемого в твердое тело ПЭП двух рассматриваемых вариантов, а также сравнению длительностей и амплитуд зондирующих сигналов.

Краткое описание методики определения формы зондирующего сигнала. Математические модели ПЭП, работающего в импульсном режиме, частично представлены в ряде более ранних работ автора, например в [15–17]. Остановимся подробнее на этом, уделив вни-

мание, в первую очередь, вопросам, не освещенным в указанных работах.

В [15] получены выражения, описывающие частотную характеристику демпфированного иммерсионного преобразователя при наличии согласующего слоя. При этом акустической нагрузкой ПЭП выбрана жидкость (водная среда). В настоящей работе упомянутые выражения не приводятся. Для вывода указанных соотношений использована теория схем-аналогов ПЭП пластинчатого типа. Названные уравнения могут быть применены для решения задачи, поставленной в настоящей работе. Рассмотрим один из возможных способов определения частотной характеристики многослойного ПЭП, соответствующего, например, варианту 2 (в данном случае в конструкции преобразователя присутствует модуль 2, т. е. демпфер. Электрическая корректирующая цепь, т. е. модуль 1 отсутствует). По аналогии с решением задачи для жидкой акустической нагрузки входное механическое сопротивление слоя с номером 1, нагруженного на твердое тело:

$$Z_{\text{вх}}^{(1)} = Z_1 \frac{Z_1 \sin x_1 - jZ_{\text{н}} \cos x_1}{Z_{\text{н}} \sin x_1 - jZ_1 \cos x_1},$$

где Z_1 и $Z_{\text{н}}$ – акустические сопротивления первого слоя (наружного контактного слоя) и акустической нагрузки (твердого тела); x_1 – волновая толщина слоя 1.

Совершенно аналогично можно записать входное акустическое сопротивление второго слоя (протектора), нагруженного на систему, представляющую собой первый слой вместе с акустической нагрузкой на среду $Z_{\text{н}}$:

$$Z_{\text{вх}}^{(2)} = Z_2 \frac{Z_2 \sin x_2 - jZ_{\text{вх}}^{(1)} \cos x_2}{Z_{\text{вх}}^{(1)} \sin x_2 - jZ_2 \cos x_2},$$

где Z_2 и x_2 – акустическое сопротивление и волновая толщина слоя 2 (протектора).

Входное акустическое сопротивление третьего слоя (внутреннего контактного слоя)

$$Z_{\text{вх}}^{(3)} = Z_3 \frac{Z_3 \sin x_3 - jZ_{\text{вх}}^{(2)} \cos x_3}{Z_{\text{вх}}^{(2)} \sin x_3 - jZ_3 \cos x_3},$$

где Z_3 и x_3 – акустическое сопротивление и волновая толщина слоя 3 (внутреннего контактного слоя).

Таким образом, задача сведена к виду, при котором пьезопластина нагружена с одной стороны на сопротивление демпфера, а с другой – на импеданс $Z_{\text{вх}}^{(3)}$. Это означает, что частотная зависимость колебательной скорости на рабочей грани пластины может быть определена в соответствии с формулами, указанными в [15]. Для этого необходимо еще учесть коэффициенты передачи слоев по колебательной скорости.

Коэффициент передачи по колебательной скорости первого слоя

$$k_v^{(1)} = \frac{1}{\cos x_1 + j \frac{Z_{\text{н}}}{Z_1} \sin x_1}.$$

Коэффициент передачи по колебательной скорости второго слоя (протектора)

$$k_v^{(2)} = \frac{1}{\cos x_2 + j \frac{Z_{\text{вх}}^{(1)}}{Z_2} \sin x_2}.$$

Коэффициент передачи по колебательной скорости третьего слоя

$$k_v^{(3)} = \frac{1}{\cos x_3 + j \frac{Z_{\text{вх}}^{(2)}}{Z_3} \sin x_3}.$$

Общий коэффициент передачи по колебательной скорости трех слоев равен произведению всех трех коэффициентов: $k_v^{\text{общ}} = k_v^{(1)} k_v^{(2)} k_v^{(3)}$. Предложенный алгоритм определения частотной характеристики излучающей системы удобен для применения на практике.

Далее необходимо задаться формой электрического сигнала, поступающего на пьезопластину. В качестве такого возбуждающего сигнала можно, как и в более ранних работах, выбрать один полупериод синусоиды на частоте антирезонанса пьезопластины:

$$U(t) = \begin{cases} \sin \omega_0 t & \text{при } 0 \leq t \leq T_0/2; \\ 0 & \text{при } t \notin (0, T_0/2), \end{cases}$$

где T_0 – период колебаний на частоте ω_0 .

Форма сигнала, излучаемого рассматриваемым ПЭП (форма зондирующего акустического импульса) может быть определена аналогично тому, как это сделано в [15–17]:

$$v_{\text{вых}}(T) \sim \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{изл}}(x) F_{\text{изл}}(x) \exp(jxT) dx,$$

где $v_{\text{вых}}(T)$ – временная зависимость колебательной скорости сигнала на выходе пьезопластины; $U_{\text{изл}}(x)$ – спектральная плотность возбуждающего пластину сигнала; $F_{\text{изл}}(x)$ – частотная характеристика ПЭП. Безразмерное время T задается как $T = t/(T_0/2)$. Необходимость задания безразмерного времени T диктуется требованием получения результата в возможно более общем виде, т. е. измерением длительности излучаемого сигнала не в единицах реального времени, а посредством определения ее в виде числа полупериодов колебаний на собственной частоте пластины. Полученные результаты в этом случае можно будет использовать для любых собственных частот пьезопластин. Длительность сигнала в единицах реального времени (например, в микросекундах) можно получить простыми вычислениями.

Итак, кратко рассмотрена методика определения формы излучаемого акустического сигнала на выходе преобразователя, имеющего демпфер. Задача определения формы зондирующего сигнала для случая ПЭП с подключенной к нему корректирующей электрической нагрузкой решается аналогично. Здесь при получении частотной характеристики необходимо учитывать параметры, характеризующие излучающую систему: n и Q . При определенных значениях данных параметров можно получить наиболее короткий излучаемый акустический импульс.

Интерес представляет сравнение потенциальных возможностей двух способов сокращения длительности зондирующего сигнала – демпфированием пьезоэлемента и за счет применения электрической коррекции. Важным вопросом при этом является сравнение амплитуд излучаемых сигналов.

Обсуждение результатов расчета. По изложенной выше методике в статье были полу-

чены расчетные результаты, позволяющие сравнить 2 типа ПЭП – с демпфером (без корректирующей цепи, когда снижение длительности зондирующего импульса достигалось за счет усиления степени демпфирования пьезоэлемента, т. е. за счет увеличения значения удельного акустического сопротивления демпфера) и с корректирующей цепью (без демпфера, когда снижение длительности зондирующего сигнала достигалось посредством определения оптимальных значений параметров n и Q , характеризующих излучающую систему).

Перейдем к обсуждению результатов расчетов. Договоримся, что при проведении расчетов длительность излучаемых импульсов $\tau_{\text{и}}$ будет оцениваться по уровню (–20 дБ). Это означает, что длительность сигнала $\tau_{\text{и}}$ будет определяться нахождением безразмерного времени T , прошедшего от начала импульса до момента спада его амплитуды в 10 раз по отношению к максимальной амплитуде.

При проведении расчетов значения удельных акустических сопротивлений материалов внешнего и внутреннего контактных слоев были выбраны $z_1 = z_3 = 1.5 \cdot 10^6$ Па·с/м (водное заполнение). Волновая толщина протектора при проведении всего расчета была постоянной и равной $\alpha_2 = 0.1$. Удельное акустическое сопротивление акустической нагрузки (сталь) $z_{\text{н}} = 45 \cdot 10^6$ Па·с/м. Волновая толщина внутреннего контактного слоя определяется лишь технологическими возможностями изготовления ПЭП и контролем ее постоянства в процессе работы. Ее значение в расчете принято $\alpha_3 = 0.01$. Волновая толщина внешнего контактного слоя при реальных измерениях выбирается в зависимости от состояния поверхности объекта контроля, поэтому в расчете α_1 изменялось от 0.01 до 0.1. Удельное акустическое сопротивление протектора в процессе проведения расчета изменялось в широком диапазоне от $2 \cdot 10^6$ до $45 \cdot 10^6$ Па·с/м.

Необходимо отметить, что при исследовании импульсного режима работы ПЭП с корректирующей цепью (при отсутствии демпфера) за счет большого количества расчетов было уста-

новлено, что во всем рассмотренном диапазоне изменения волновой толщины внешнего контактного слоя (α_1 изменялось от 0.01 до 0.1) оптимальные значения параметров n и Q , характеризующих излучающую систему, оставались постоянными. Эти значения оказались равными следующим значениям: $n_{\text{opt}} = 1.15$ и $Q_{\text{opt}} = 2$. Под оптимальными понимаются такие значения n и Q , при которых излучатель с подключенной к нему электрической корректирующей цепью излучал наиболее короткие акустические зондирующие сигналы. Именно в этом состоит критерий оптимальности указанных параметров. Значения n_{opt} и Q_{opt} найдены методом их последовательного перебора.

Некоторые результаты теоретических исследований зависимостей длительностей τ_n и максимальных амплитуд колебательной скорости v_{max} излучаемых импульсов от значений удельных акустических сопротивлений протектора для двух исследуемых вариантов ПЭП представлены на рис. 2–7. Так, на рис. 2, 4 и 6 приведены результаты расчетно-теоретической

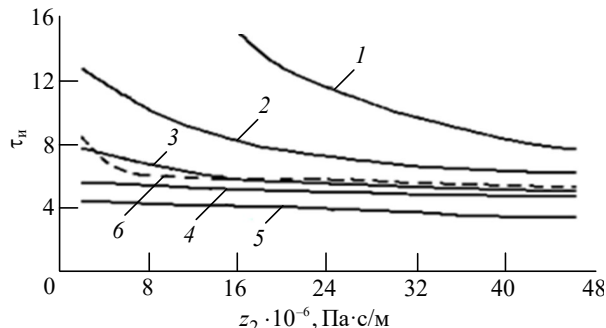


Рис. 2. Зависимости длительностей зондирующих сигналов от параметра z_2 при $\alpha_1 = 0.01$:

1 – $z_d = 0$; 2 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м;

3 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 15 \cdot 10^6$ Па·с/м;

5 – $z_d = 20 \cdot 10^6$ Па·с/м; 6 – соответствует случаю подключения корректирующей цепи с оптимальными параметрами n и Q

Fig. 2. Dependences of the durations of probing signals on the parameter z_2 at $\alpha_1 = 0.01$:

1 – $z_d = 0$; 2 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м;

3 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 15 \cdot 10^6$ Па·с/м;

5 – $z_d = 20 \cdot 10^6$ Па·с/м; 6 – corresponds to the case of connecting a corrective circuit with optimal parameters n and Q

работы, направленной на изучение длительности излучаемых преобразователем акустических сигналов. На упомянутых рисунках показаны семейства кривых $\tau_n(z_2)$, соответствующие различным значениям волновой толщины α_1 контактного слоя 1. По оси абсцисс на каждом из рисунков отложены значения z_2 , соответствующие широкому диапазону изменения удельных акустических сопротивлений протектора. По осям ординат – длительности

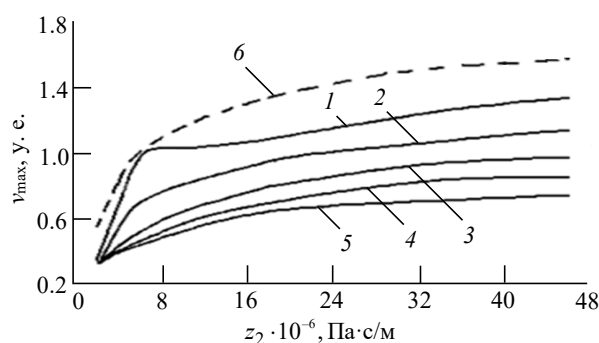


Рис. 3. Зависимости $v_{\text{max}}(z_2)$ при $\alpha_1 = 0.01$.

Нумерация кривых соответствует рис. 2

Fig. 3. Dependences $v_{\text{max}}(z_2)$ at $\alpha_1 = 0.01$.

The numbering of the curves corresponds to Fig. 2

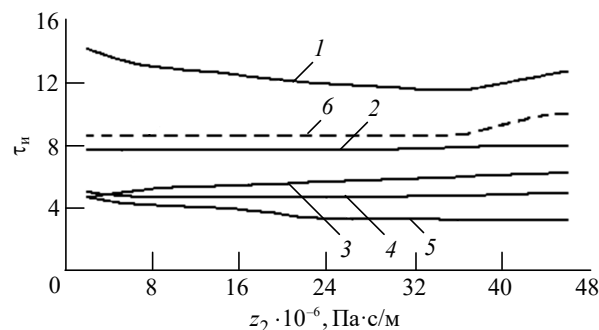


Рис. 4. Зависимости длительностей зондирующих сигналов от параметра z_2 при $\alpha_1 = 0.05$:

1 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м; 2 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м;

3 – $z_d = 15 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 20 \cdot 10^6$ Па·с/м;

5 – $z_d = 25 \cdot 10^6$ Па·с/м; 6 – соответствует случаю подключения к ПЭП электрической нагрузки

Fig. 4. Dependences of the durations of probing signals on the parameter z_2 at $\alpha_1 = 0.05$:

1 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м; 2 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м;

3 – $z_d = 15 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 20 \cdot 10^6$ Па·с/м;

5 – $z_d = 25 \cdot 10^6$ Па·с/м; 6 – corresponds to the case of connecting an electrical load to the probe

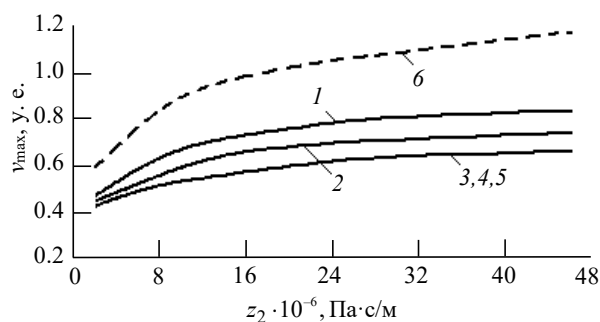


Рис. 5. Зависимости $v_{\max}(z_2)$ при $\alpha_1 = 0.05$.

Нумерация кривых соответствует рис. 2

Fig. 5. Dependences $v_{\max}(z_2)$ at $\alpha_1 = 0.05$.

The numbering of the curves corresponds to Fig. 2

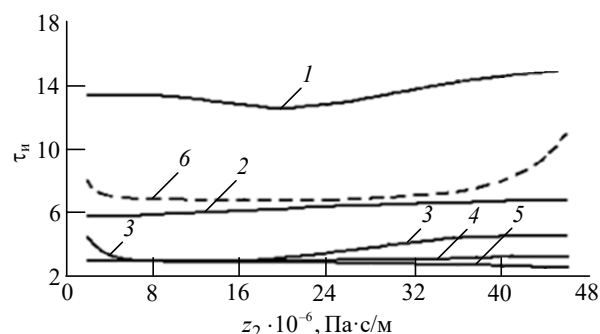


Рис. 6. Зависимости $\tau_n(z_2)$ при $\alpha_1 = 0.1$:

1 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Па·с/м; 2 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м;

3 – $z_d = 15 \cdot 10^6$ Па·с/м; 4 – $z_d = 20 \cdot 10^6$ Па·с/м;

5 – $z_d = 25 \cdot 10^6$ Па·с/м; 6 – соответствует варианту ПЭП с корректирующей электрической цепью

Fig. 6. Dependences $\tau_n(z_2)$ at $\alpha_1 = 0.1$:

1 – $z_d = 5 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 2 – $z_d = 10 \cdot 10^6$ Pa·s/m;

3 – $z_d = 15 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 4 – $z_d = 20 \cdot 10^6$ Pa·s/m;

5 – $z_d = 25 \cdot 10^6$ Pa·s/m; 6 – corresponds to the variant of the probe with a corrective electrical circuit

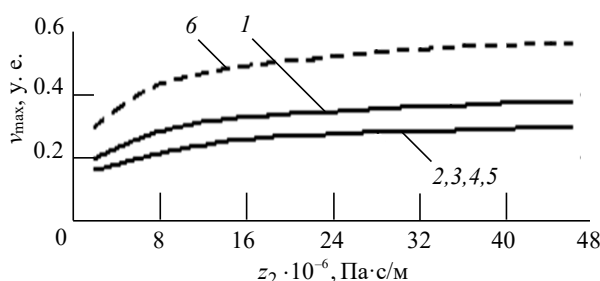


Рис. 7. Зависимости $v_{\max}(z_2)$ при $\alpha_1 = 0.1$.

Нумерация кривых соответствует рис. 6

Fig. 7. Dependences $v_{\max}(z_2)$ at $\alpha_1 = 0.1$.

The numbering of the curves corresponds to Fig. 6

зондирующих сигналов τ_n . На каждом из упомянутых рисунков сплошными кривыми обозначены зависимости $\tau_n(z_2)$, относящиеся к варианту ПЭП, имеющему демпфер. Нумерация этих кривых соответствует различным значениям удельного акустического сопротивления демпфера z_d . Кривые, обозначенные штриховой линией, относятся к варианту ПЭП, у которого демпфер отсутствует, но к электрической стороне ПЭП подключена корректирующая RL -цепь с оптимально определенными параметрами.

Результаты сравнения амплитуд зондирующих сигналов для вариантов ПЭП приведены на рис. 3, 5 и 7. На каждом из них по осям абсцисс отложены значения z_2 . По осям ординат – значения v_{\max} , пропорциональные амплитудам излучаемых сигналов. Они выражены в условных единицах (у. е.). Данный факт объясняется тем, что задача определения амплитуд излучаемых сигналов решалась с точностью до постоянного множителя. Зависимости, относящиеся к демпфированному преобразователю, показаны сплошными кривыми. Штриховыми линиями показаны зависимости, относящиеся к исследованию ПЭП с подключенной к нему корректирующей цепью, имеющей оптимальные значения параметров n и Q .

Из данных, представленных на рис. 2, можно видеть, что при малых волновых размерах внешнего контактного слоя длительности излучаемого сигнала на выходе ПЭП с подключенной RL -цепью (при оптимальных n и Q) очень близки к варианту демпфированного ПЭП при $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м (см. кривую 6). Стоит при этом отметить, что для меньших степеней демпфирования длительности акустических сигналов превышают их значения, достигнутые за счет применения цепи. Это наблюдается во всем рассмотренном диапазоне изменения параметра z_2 .

На рис. 3 показано семейство кривых, отражающих зависимости $v_{\max}(z_2)$ при $\alpha_1 = 0.01$. Нумерация расчетных кривых сохранена той же, что и на рис. 2. Можно видеть, что сигналы на выходе ПЭП с электрической нагрузкой превышают по амплитуде все сигналы, относящиеся к

демпфированному преобразователю (даже при $z_d = 0$). Это, несомненно, можно отнести к достоинствам применения корректирующих цепей.

На рис. 4 представлены данные, касающиеся исследования длительности акустических импульсов при рассмотрении излучающего ПЭП в двух вариантах его построения. Анализируя данные, приведенные на рис. 4, можно вновь сделать вывод о том, что длительность излучаемых преобразователем сигналов в случае наличия электрической цепи с оптимальными значениями параметров n и Q , характеризующих излучающую многослойную систему, весьма близка к длительности зондирующих импульсов, соответствующих варианту применения демпфера при $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м (кривая 2). При меньших степенях демпфирования пьезоэлемента длительности зондирующих сигналов оказываются больше, нежели для случая применения цепи.

На рис. 5 представлены результаты сравнения амплитуд излучаемых сигналов при работе ПЭП в обоих рассматриваемых вариантах для $\alpha_1 = 0.05$. Нумерация кривых соответствует рис. 4. Стоит отметить, что кривые 3, 4 и 5 мало отличаются друг от друга, поэтому на рисунке они графически отмечены одной линией, обозначенной 3, 4, 5. Из рисунка можно видеть, что вновь предпочтение с точки зрения максимума сигнала следует отдать варианту ПЭП с электрической нагрузкой.

На рис. 6 показано семейство кривых, отражающих зависимость длительностей импульсов, излучаемых многослойным преобразователем для максимальной из рассмотренных в настоящей статье волновых толщин наружного контактного слоя ($\alpha_1 = 0.1$). Интересно отметить, что и в этом случае подключение электрической нагрузки с оптимальными параметрами примерно соответствует применению демпфированного ПЭП со степенью демпфирования, определяемой значением $z_d = 10 \cdot 10^6$ Па·с/м (кривая 2 на рис. 6). При $z_d \leq 10 \cdot 10^6$ Па·с/м использование корректирующей цепи снова оказывается предпочтительным.

На рис. 7 приведены данные по результатам сравнения амплитуд излучаемых сигналов, формируемых с помощью ПЭП при использовании электрической цепи и демпфирования пьезоэлемента при $\alpha_1 = 0.1$. Из анализа данных, представленных на рисунке, можно видеть, что вновь предпочтение с точки зрения максимума сигнала следует отдать варианту ПЭП с электрической нагрузкой.

На рис. 7, аналогично тому, как это было на рис. 5, некоторые кривые, отражающие исследуемые зависимости, сливаются друг с другом. Вследствие этого они отмечены одной кривой, которая обозначена как 2, 3, 4, 5.

Выводы. В настоящей статье описаны результаты расчетно-теоретического исследования импульсного режима работы многослойного ПЭП, применяемого для ультразвукового контроля. В качестве акустической нагрузки выбрана сталь. Проведено сравнение параметров излучаемых сигналов в двух вариантах, подразумевающих снижение зондирующих импульсов, – демпфированием пьезоэлемента и за счет подключения электрической корректирующей цепи. В качестве исследуемых параметров рассмотрены амплитуда и длительность акустических импульсов. Результаты расчета свидетельствуют о том, что применение электрической корректирующей цепи с правильно определенными параметрами n_{opt} и Q_{opt} , характеризующими излучающую систему, позволяет в широком диапазоне изменения значений удельного акустического сопротивления протектора добиваться меньшей длительности зондирующих сигналов на выходе ПЭП, чем в случае использования демпфированного ПЭП при $z_d \leq 10 \cdot 10^6$ Па·с/м.

При $z_d > 10 \cdot 10^6$ Па·с/м предпочтение стоит отдавать механическому демпфированию пьезоэлемента. Установлено, что амплитуда сигналов на выходе ПЭП с подключенной к нему корректирующей цепью превышает амплитуду сигнала при демпфировании пьезоэлемента.

Описанные в данной статье результаты могут представлять интерес для разработчиков пьезоаппаратуры, применяемой для целей ультразвукового контроля материалов и изделий.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справ.: в 7 т. Т. 3: Ультразвуковой контроль / под общ. ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справ.: в 2 кн. Кн. 1 / под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1986. 488 с.
3. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. СПб.: Гуманистика, 2009. 904 с.
4. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
5. Синтез и коррекция акустических сигналов в системах излучения-приема. Алгоритм расчета и проектирования / С. И. Коновалов, Р. С. Коновалов, В. М. Цаплев, З. М. Юлдашев, Д. И. Нефедьев // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 39–46. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-4
6. Fabrication and characterization of transducers / E. P. Papadakis, C. G. Oakley, A. R. Selfridge, B. Maxfield // Physical Acoustics. 1999. Vol. 24. P. 43–134. doi: 10.1016/S0893-388X(99)80024-4
7. Sherman Ch. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York: Springer, 2007. 610 p.
8. Stepanov B. G., Bystrova N. A. Method of excitation of plate transducers for the generation of short acoustic pulses // Intern. Scientific Conf. Technical and Natural Sciences, SPb., June 2018. SPb.: National development, 2018. P. 28–32.
9. Найда С. А. Возбуждение коротких ультразвуковых импульсов недемпфированным пьезоэлектрическим преобразователем // Электроника и связь. 2012. № 2. С. 35–40.
10. Wolfgang S., Nelson N. H. Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization // Physical Acoustics / ed. by W. P. Mason, R. N. Thurston. 1979. Vol. 14. P. 277–406.
11. Uchino K. Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. 830 p.
12. Григорьев М. А., Толстиков А. В., Навроцкая Ю. Н. Возбуждение и прием коротких акустических импульсов многослойными пьезокерамическими преобразователями // Акуст. журн. 2003. Т. 49, № 4. С. 489–493.
13. Данилов В. Н., Воронкова Л. В. Исследование возможностей ультразвукового контроля чугуна с пластинчатым графитом с использованием стандартных прямых преобразователей // Контроль. Диагностика. 2020. Т. 23, № 1. С. 4–18.
14. Данилов В. Н., Воронкова Л. В. Исследование влияния затухания упругих продольных волн в чугуне с пластинчатым графитом на характеристики сигналов при ультразвуковом контроле // Контроль. Диагностика. 2019. № 6. С. 18–33.
15. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
16. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. Effect of electrical circuits on duration of an acoustic pulse radiated by a piezoplate // J. Acoust. Soc. Am. 2009. Vol. 125, № 3. P. 1456–1460. doi: 10.1121/1.3075582
17. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Исследование возможности излучения и приема коротких импульсов при использовании механического демпфирования или согласующих слоев // Дефектоскопия. 1998. № 8. С. 3–12.

Информация об авторах

Коновалов Сергей Ильич – кандидат технических наук (1999), доцент (2001), доцент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 160 научных работ. Сфера научных интересов – неразрушающий контроль; теория электроакустических преобразователей; исследование импульсного режима работы пьезопреобразователей и систем излучения-приема.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

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

Юлдашев Зафар Мухамедович – доктор технических наук (1999), профессор (2001), заведующий кафедрой биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 255 научных работ. Сфера научных интересов – медицинское приборостроение, инструментальные методы медицинской диагностики, метрология.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: yuld@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1075-3420>

References

1. *Nerazrushayushchiy kontrol'. Vol. 3. Ultrazvukovoiy kontrol'* [Non-Destructive Testing: in 7 vol. Vol. 3. Ultrasonic Control]. Ed. by V. V. Klyuev. Moscow, *Mashinostroenie*, 2004, 864 p. (In Russ.)
2. *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy: v 2-h kn. Kn. 1* [Instruments for Non-Destructive Testing of Materials and Products: in 2 Books. Book 1]. Ed. by V. V. Klyuev. Moscow, *Mashinostroenie*, 1986, 488 p. (In Russ.)
3. Potapov A. I., Syasko V. A. *Nerazrushayushchiye metody i sredstva kontrolya tolshchiny pokrytiy i izdeliy* [Non-Destructive Methods and Means of Controlling the Thickness of Coatings and Products]. SPb., *Gumanistika*, 2009, 904 p. (In Russ.)
4. *Ultrazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya* [Ultrasonic Piezoelectric Transducers for Nondestructive Testing]. Ed. by I. N. Ermolov. Moscow, *Mashinostroenie*, 1986, 280 p. (In Russ.)
5. Konovalov S. I., Konovalov R. S., Tsaplev V. M., Yuldashev Z. M., Nefed'ev D. I. Synthesis and Correction of Acoustic Signals in Radiation-Reception Systems. Calculation and Design Algorithm. Measuring. Monitoring. Management. Control. 2022, no. 3, pp. 38–46. doi: 10.21685/2307-5538-2022-3-4 (In Russ.)
6. Papadakis E. P., Oakley C. G., Selfridge A. R., Maxfield B. Fabrication and Characterization of Transducers. Physical Acoustics. 1999, vol. 24, pp. 43–134. doi: 10.1016/S0893-388X(99)80024-4
7. Sherman Ch. H., Butler J. L. Transducers and Arrays for Underwater Sound. New York, Springer, 2007, 610 p.
8. Stepanov B. G., Bystrova N. A. Method of Excitation of Plate Transducers for the Generation of Short Acoustic Pulses. Intern. Scientific Conf. Technical and Natural Sciences. SPb., June 2018. SPb., National development, 2018, pp. 28–32.
9. Naida S. A. Excitation of Short Ultrasonic Pulses by an Undamped Piezoelectric Transducer. Electronics and Communication. 2012, no. 2, pp. 35–40. (In Russ.)
10. Wolfgang S., Nelson N. H. Ultrasonic Transducers for Materials Testing and Their Characterization. Physical Acoustics. Ed. by W. P. Mason, R. N. Thurston. 1979, vol. 14, pp. 277–406.
11. Uchino K. Advanced Piezoelectric Materials. Science and Technology. 2nd ed. Cambridge, Woodhead Publishing, 2017, 830 p.
12. Grigor'ev M. A., Tolstikov A. V., Navrotskaya Yu. N. Generation and Reception of Short Acoustic Pulses by Multilayer Piezoelectric Transducers. Acoustical Physics. 2003, vol. 49, no. 4, pp. 489–493. (In Russ.)
13. Danilov V. N., Voronkova L. V. Investigation of the Possibilities of Ultrasonic Testing of Cast Iron with Lamellar Graphite Using Standard Normal Probe. Testing. Diagnostics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 4–18. (In Russ.)
14. Danilov V. N., Voronkova L. V. Investigation of the Effect of Attenuation of Elastic Longitudinal Waves in Cast Iron with Flake Graphite on the Characteristics of Signals during Ultrasonic Testing. Testing. Diagnostics. 2019, no. 6, pp. 18–33. (In Russ.)
15. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. *Osobennosti impul'snykh rezhimov raboty elektro-akusticheskikh piezoelektricheskikh preobrazovatelei* [Peculiarities of Pulsed Operating Modes of Electroacoustic Piezoelectric Transducers]. SPb., *Politehnika*, 2014, 294 p. (In Russ.)
16. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. Effect of Electrical Circuits on Duration of an Acoustic Pulse Radiated By a Piezoplate. J. Acoust. Soc. Am. 2009, vol. 125, no. 3, pp. 1456–1460. doi: 10.1121/1.3075582
17. Konovalov S. I., Kuz'menko A. G. Short-Pulse Emission and Detection with Mechanical Damping or Matching Layers. Russian J. of Nondestructive Testing. 1998, vol. 34, no. 8, pp. 559–565. (In Russ.)

Information about the authors

Sergey I. Konovalov, Cand. Sci. (Eng.) (1999), Associate Professor (2001) of the Department of Electroacoustics and Ultrasonic Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 160 scientific publications. Area of expertise: nondestructive testing; the theory of electroacoustic transducers; the investigation of pulsed mode of operation of piezoelectric transducers and radiating-and-receiving systems. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: sikonvalov.eut@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5033-344X>

Zafar M. Yuldashev, Dr Sci. (Eng.) (1999), Professor (2001), Head of the Department of Biotechnical Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 255 scientific publications. Area of expertise: medical instrumentation; instrumental methods of medical diagnostics; metrology. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: yuld@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1075-3420>