

СИНТЕЗ И КОРРЕКЦИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ИЗЛУЧЕНИЯ-ПРИЕМА. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ

С. И. Коновалов¹, Р. С. Коновалов², В. М. Цаплев³,
З. М. Юлдашев⁴, Д. И. Нефедьев⁵

^{1,2,3,4} Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

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

⁵ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ sikonovalov.eut@gmail.com, ² rskonovalov.eut@gmail.com,

³ valery@convergences-fr.ru, ⁴ yuld@mail.ru, ⁵ iit@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются вопросы синтеза и коррекции входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема, предназначенных для акустического неразрушающего контроля. Целью работы является формализация и алгоритмизация процесса и принципов разработки новых и совершенствовании уже существующих систем акустического неразрушающего контроля, основанных на синтезе и коррекции акустических сигналов в системах излучения-приема. *Материалы и методы.* Представлен подход, основанный на двух видах коррекции сигналов в системе излучения-приема: конструктивная коррекция и коррекция входных электрических сигналов. Новизна подхода заключается в алгоритме выбора конкретного алгоритма коррекции, наилучшим образом соответствующего задачам разработчиков пьезоэлектрических преобразователей, что позволяет добиваться создания систем излучения-приема с заранее заданными параметрами акустических сигналов. *Результаты.* Представлена обобщенная структурная схема, описывающая алгоритм расчета и проектирования пьезоэлектрических преобразователей. Данная статья является первой в цикле работ, посвященных синтезу и коррекции входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема. В последующих частях будет раскрыта и подтверждена правомерность применения коррекции акустических сигналов.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, акустический зондирующий импульс, коррекция и синтез сигналов

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

Для цитирования: Коновалов С. И., Коновалов Р. С., Цаплев В. М., Юлдашев З. М., Нефедьев Д. И. Синтез и коррекция акустических сигналов в системах излучения-приема. Алгоритм расчета и проектирования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 39–46. doi:10.21685/2307-5538-2022-3-4

SYNTHESIS AND CORRECTION OF ACOUSTIC SIGNALS IN RADIATION-RECEPTION SYSTEMS. CALCULATION AND DESIGN ALGORITHM

S.I. Konovalov¹, R.S. Konovalov², V.M. Tsaplev³, Z.M. Yuldashev⁴, D.I. Nefed'ev⁵

^{1,2,3,4} St. Petersburg, Russia Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia

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

⁵ Penza State University, Penza, Russia

¹ sikonovalov.eut@gmail.com, ² rskonovalov.eut@gmail.com,

³ valery@convergences-fr.ru, ⁴ yuld@mail.ru, ⁵ iit@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The issues of synthesis and correction of input and output electrical and acoustic signals in radiation-reception systems intended for acoustic non-destructive testing are considered. The aim of the work is to formalize and algorithmize the process and principles of developing new and improving existing acoustic non-destructive testing systems based on the synthesis and correction of acoustic signals in emission-reception systems. *Materials and methods.* An approach based on two types of signal correction in the emission-reception system is presented: constructive correction and correction of input electrical signals. The novelty of the approach lies in the algorithm for choosing a specific correction algorithm that best suits the tasks of developers of piezoelectric transducers, which makes it possible to achieve the creation of emission-reception systems with predetermined parameters of acoustic signals. *Results.* A generalized block diagram is presented that describes the algorithm for calculating and designing of piezoelectric transducers. This article is the first in a series of works devoted to the synthesis and correction of input and output electrical and acoustic signals in radiation-reception systems. In the following parts, the legitimacy of applying the correction of acoustic signals will be disclosed and confirmed.

Keywords: piezoelectric transducer, acoustic probing pulse, signal correction and synthesis

Acknowledgments: 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).

For citation: 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. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(3):39–46. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-3-4

Введение

В настоящее время доля ультразвукового контроля (УЗК) среди других методов неразрушающего контроля (НК) достигает 70–80 % [1]. Этим обусловлен постоянно растущий интерес разработчиков аппаратуры НК к совершенствованию ее метрологических характеристик, что влечет за собой повышение достоверности результатов акустического метода НК. Тем самым задача разработчиков является комплексной, включающей в себя необходимость улучшения как работы отдельных элементов электроакустического тракта, так и всей системы «генератор-излучатель-среда-приемник-система обработки сигнала» в целом. Решение этой непростой задачи базируется не только на совершенствовании конструктивных элементов системы, но и на согласовании элементов между собой, синтезировании входных и выходных электрических и акустических сигналов, анализе физических полей излучателя, приемника и др. Понятие «синтез» описывает последовательность действий, позволяющую получить сигнал с заранее заданными свойствами, на основе анализа свойств систем излучения-приема.

Конечной целью, к которой стремятся разработчики аппаратуры акустического контроля, предназначенной для решения задач локационного характера, является улучшение ее характеристик (протяженность мертвой зоны, лучевая и фронтальная разрешающие способности, точность определения координат дефектов). Это возможно не только за счет применения средств обработки сигнала, но и за счет улучшения свойств чувствительных элементов. Широкое распространение в качестве чувствительных элементов систем излучения-приема получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП). Это обусловлено их более высокой чувствительностью по сравнению с преобразователями других типов [1–8]. Поэтому в работе рассматриваются ПЭП. При этом ПЭП работают в импульсном режиме, т.е. излучаемый сигнал не превышает нескольких полупериодов на рабочей частоте пьезопластины. Это обязательное условие, поскольку длительность излучаемого импульса определяет лучевую и фронтальную разрешающие способности аппаратуры акустического контроля, протяженность мертвой зоны, точность определения координат дефектов.

Целью данной работы является формализация и алгоритмизация процесса и принципов разработки новых и совершенствование уже существующих систем акустического НК, основанных на синтезе входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема.

Коррекция сигналов в системах УЗК

Существующие и вновь проектируемые системы УЗК с целью создания высокого разрешения к дефектам могут строиться на использовании двух подходов [9]:

- внесение конструктивных изменений в чувствительный элемент (ПЭП);
- формирование генератором системы УЗК электрических сигналов специальной формы.

Рассмотрим типовую схему построения одного из каналов системы УЗК (рис. 1). Импульсный генератор (ИГ) формирует импульс электрического возбуждения, который через широкополосный усилитель (У) и блок электрического согласования (БЭС) подается на пьезоэлектрический преобразователь. Акустический сигнал, излученный ПЭП в среду, принимается приемным ПЭП. Пройдя через блок электрического согласования с широкополосным усилителем, этот сигнал поступает на индикатор, например, электронно-лучевую трубку, ЖК-дисплей и т.д. Описанный алгоритм представляет собой пример классической приемно-излучающей системы.

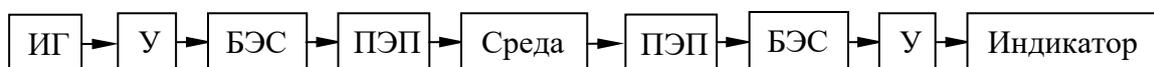


Рис. 1. Типовая схема построения одного из каналов системы УЗК:

ИГ – импульсный генератор; У – широкополосный усилитель;
БЭС – блок электрического согласования; ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь

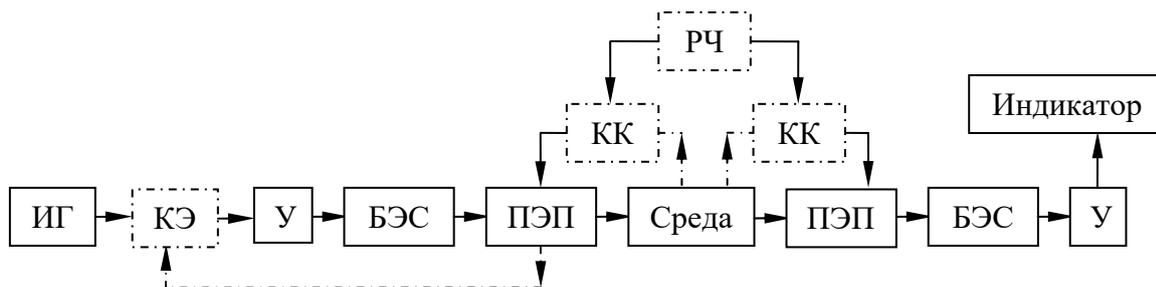


Рис. 2. Типовая схема построения одного из каналов системы УЗК высокого разрешения:

ИГ – импульсный генератор; У – широкополосный усилитель;
БЭС – блок электрического согласования; ПЭП – пьезоэлектрический преобразователь;
КК – корректор конструктивных параметров ПЭП; КЭ – корректор электрических сигналов, возбуждающих ПЭП; РЧ – разнос рабочих частот излучающего и приемного ПЭП

Для построения системы УЗК высокого разрешения требуется разработка алгоритмов коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП. Данные алгоритмы носят характер виртуальных блоков (КК и КЭ) в структурной схеме УЗК высокого разрешения (рис. 2) и подразумевают программно-аппаратное обеспечение, требующееся для внесения в ИГ и ПЭП. При этом учет влияния среды на излучающий и приемный ПЭПы, а также возбуждаемый импульсным генератором (ИГ) сигнал, подаваемый на ПЭП, описаны в схеме с помощью обратных связей.

Реализация подходов к конструированию ПЭП должна проводиться с учетом их конструктивных особенностей, а также методов возбуждения излучающих преобразователей и обработки данных приемных преобразователей. На рис. 3 приведена обобщенная схема системы излучения-приема, учитывающая алгоритмы коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП. Данная схема раскрывает сущность базовых принципов и концепций построения импульсных ПЭП и систем излучения-приема на их основе. При этом методология проектирования импульсных пьезоэлектрических преобразователей ультразвуковых дефектоскопов с заранее заданными параметрами излучаемого акустического сигнала требует анализа существующих и разработки новых моделей расчета импульсных многослойных ПЭП, методов и методик коррекции сигналов. Их описанию будут

посвящены будущие работы авторов. В данной работе остановимся на алгоритме расчета и проектирования ПЭП, учитывающем алгоритмы КК и КЭ.

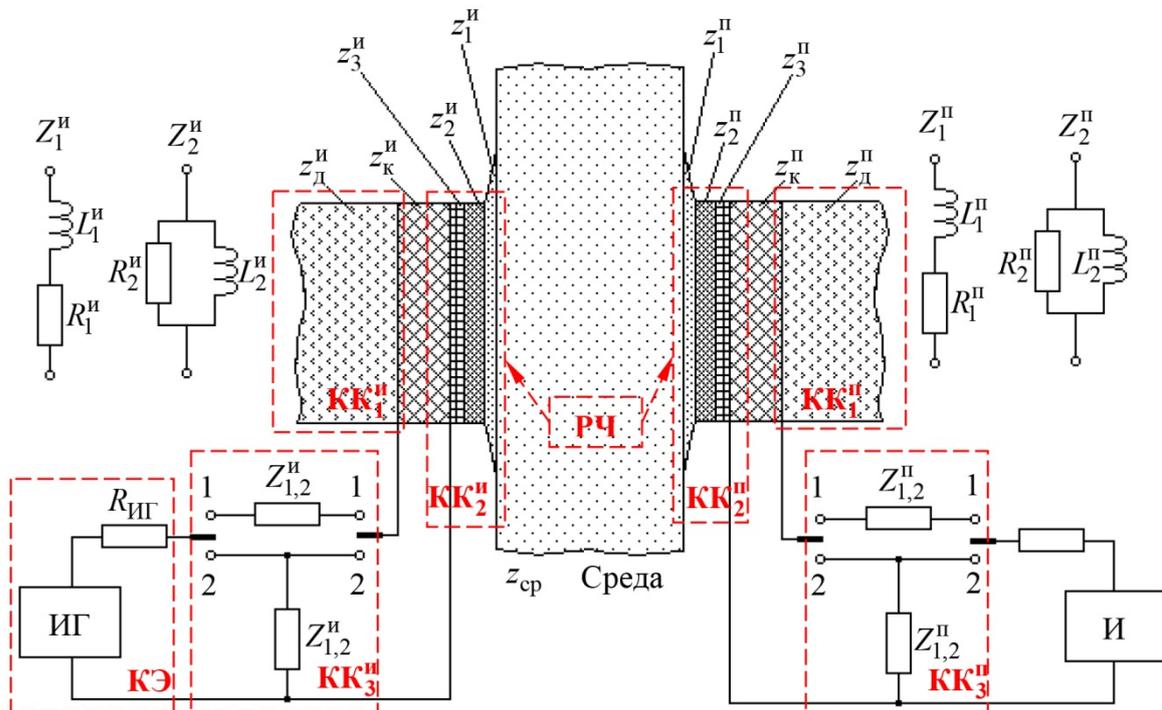


Рис. 3. Обобщенная схема системы излучения-приема, учитывающая алгоритмы коррекции конструктивных параметров ПЭП и электрических сигналов, возбуждающих ПЭП: $КК_{1,2,3}^{и,п}$ – корректор конструктивных параметров излучающего (и) и приемного (п) ПЭП на основе демпфирования (1), согласующих слоев (2) и корректирующих электрических цепей (3); КЭ – корректор электрических сигналов, возбуждающих ПЭП; РЧ – разнос рабочих частот излучающего (и) и приемного (п) ПЭП; ИГ – импульсный генератор; И – индикатор; $z_{д,к,1,2,3}^{и,п}$ – удельные акустические сопротивления элементов излучающего (и) и приемного (п) ПЭП (д – демпфер, к – активный материал; 1, 2, 3 – переходные слои); $L_{1,2}^{и,п}$, $R_{1,2}^{и,п}$, $Z_{1,2}^{и,п}$ – индуктивность, активное сопротивление и полное сопротивление, подключаемых к излучателю (и) и приемнику (п) электрических корректирующих цепей различного типа подключения; $R_{ИГ}$ – внутреннее сопротивление ИГ

Алгоритм расчета и проектирования ПЭП

Подходы разработчиков ПЭП к их проектированию могут строиться на различных принципах, опирающихся на общетехнические, конструктивные, технологические и другие особенности разрабатываемых ПЭП. При этом требования технического задания (ТЗ) на разработку ПЭП в проектировании первично. Для уже изготовленных ПЭП в случае, при котором они не удовлетворяют требованиям заказчика и/или ТЗ, возникает необходимость отбраковки или при возможности внесения корректировки в режимы их работы. Данные корректировки (поскольку ПЭП уже изготовлен) не могут опираться на конструктивные или технологические изменения в нем, а исключительно на режимы его возбуждения-приема.

В общем плане требования ТЗ и/или заказчика подразумевают необходимость поиска критерия, позволяющего определить оптимум между формой сигнала, излучаемого ПЭП, и его длительностью, который находится из импульсной характеристики ПЭП по ГОСТ Р 55808–2013¹. В данном исследовании указанный критерий состоит в поиске оптимума между максимумом амплитуды зондирующего импульса и минимумом его длительности. Эти требования противоречат друг другу с физической точки зрения. Изложенное обстоятельство

¹ ГОСТ Р 55808–2013. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний.

предопределило необходимость создания алгоритма расчета и проектирования (РП) ПЭП, представленного в виде схемы на рис. 4. Данный алгоритм является отражением процесса, предшествующего этапу изготовления ПЭП, базирующегося на требованиях ТЗ к ПЭП и учитывающего необходимость использования методов и методик расчета заданных (требованиями ТЗ) характеристик ПЭП.

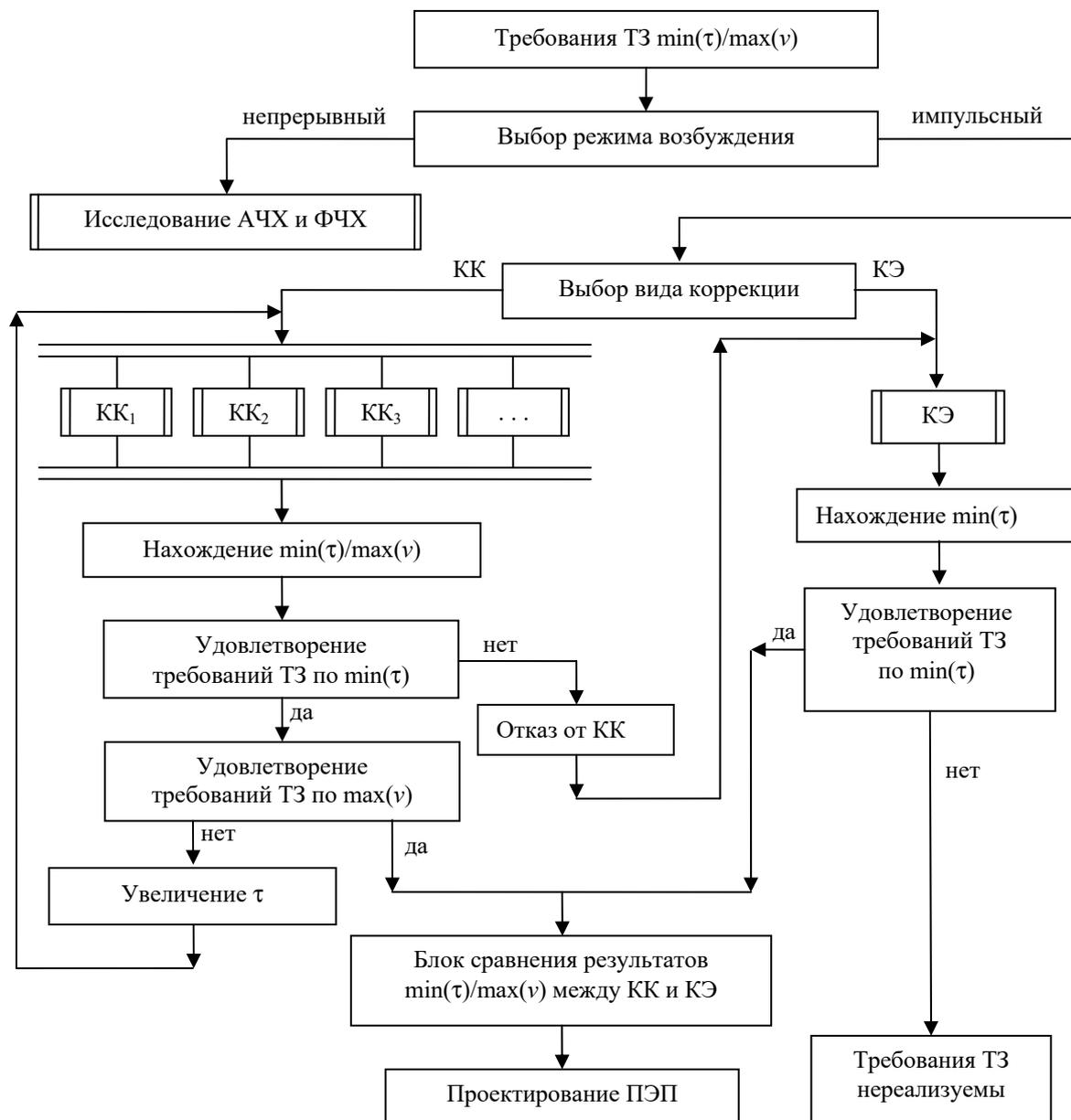


Рис. 4. Схема алгоритма расчета и проектирования ПЭП

Представленный на рис. 4 алгоритм РП ПЭП базируется на анализе разработчиком ПЭП требований ТЗ. Основным критерием при этом является поиск оптимума между максимумом амплитуды зондирующего импульса и минимумом его длительности ($\min(\tau)/\max(v)$), где τ – длительность зондирующего импульса, v – амплитуда колебательной скорости на выходе излучающего ПЭП). В случае возбуждения преобразователя непрерывным электрическим сигналом расчет ведется традиционными методами исследования амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной характеристик (ФЧХ) ПЭП («Исследования АЧХ и ФЧХ ПЭП»). Непрерывный режим работы ПЭП не является предметом исследования данной работы, поэтому в алгоритме РП ПЭП далее не рассматривается. Импульсный режим возбуждения ПЭП предполагает использование в качестве входного электрического сигнала входного воздействия

длительностью, не превышающей нескольких полупериодов колебаний на собственной частоте колебаний ПЭП. Для достижения требований ТЗ у разработчика может возникнуть необходимость использования методик коррекции ПЭП (КК1, КК2, КК3, КЭ и др.). Для этого в алгоритме предусмотрено наличие блоков «Выбор вида коррекции», «КК1», «КК2», «КК3», «КЭ» и др. Каждый из этих блоков предполагает использование методов и методик расчета характеристик ПЭП (τ и ν), описание которых будет изложено в последующих работах. В рамках этих методик коррекции происходит оценка $\min(\tau)$ для ПЭП («Нахождение $\min(\tau)$ »). Если минимальная длительность сигнала не удовлетворяет требованиям ТЗ («Удовлетворение требованиям ТЗ по $\min(\tau)$ »), то проектирование ПЭП по требованиям ТЗ невозможно. В этом случае заказчику необходим обоснованный ответ о невозможности выполнения его требований. Если же поставленная задача выполнима, то при использовании методик КК необходимо еще и учет амплитуды зондирующего импульса («Удовлетворение требованиям ТЗ по $\max(\nu)$ »). При значении максимальной амплитуды в импульсе меньше заданной по ТЗ необходимо увеличить длительность зондирующего сигнала τ («Увеличение τ ») в пределах допустимых по ТЗ и повторить цикл коррекции КК. Такие итерации могут быть проведены многократно. Алгоритм завершается блоками «Блок сравнения результатов $\min(\tau)/\max(\nu)$ между КК и КЭ» и «Проектирование ПЭП». Сравнение результатов позволяет выделить наилучшую методику коррекции из КК и КЭ или их совокупности и приступить к конструированию ПЭП.

Заключение

Представлена обобщенная структурная схема, описывающая алгоритм расчета и проектирования ПЭП. На базе рассмотренного алгоритма РП ПЭП осуществляется поиск критерия, позволяющего определить оптимум между формой сигнала, излучаемого ПЭП, и его длительностью.

Работа является первой в цикле работ, посвященных синтезу и коррекции входных и выходных электрических и акустических сигналов в системах излучения-приема. В последующих статьях будет раскрыта и подтверждена правомерность применения коррекции акустических сигналов.

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. Алешин Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений : учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2006. 366 с.
3. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс : Минтис, 1974. 256 с.
4. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М. : Машиностроение, 1986. 280 с.
5. Ганопольский В. В., Касаткин Б. А., Легуша Ф. Ф. [и др.] Пьезокерамические преобразователи : справ. / под ред. С. И. Пугачева. Л. : Судостроение, 1984. 256 с.
6. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М. : Машиностроение, 1982. 157 с.
7. Шарапов В. М., Мусиенко М. П., Шарапова Е. В. Пьезоэлектрические датчики / под ред. В. М. Шарапова. М. : Техносфера, 2006. 632 с.
8. Шарапов В. М., Минаев И. Г., Сотула Ж. В., Куницкая И. Г. Электроакустические преобразователи / под ред. В. М. Шарапова. М. : Техносфера, 2013. 296 с.
9. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб. : Политехника, 2014. 294 с.

References

1. Klyueva V.V. (ed.). *Nerazrushayushchiy kontrol': sprav. : v 7 t. T. 3. Ul'trazvukovoy kontrol' = Ultrasonic control*. Moscow: Mashinostroenie, 2004:864. (In Russ.)
2. Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedineniy: ucheb. posobie = Physical methods of non-destructive testing of welded joints : textbook*. Moscow: Mashinostroenie, 2006:366. (In Russ.)

3. Domarkas V.I., Kazhis R.-I.Yu. *Kontrol'no-izmeritel'nye p'ezoelektricheskie preobrazovateli = Control and measuring piezoelectric converters*. Vil'nyus: Mintis, 1974:256. (In Russ.)
4. Ermolova I.N. (ed.). *Ul'trazvukovye preobrazovateli dlya nerazrushayushchego kontrolya = Ultrasonic transducers for non-destructive testing*. Moscow: Mashinostroenie, 1986:280. (In Russ.)
5. Ganopol'skiy V.V., Kasatkin B.A., Legusha F.F. et al. *P'ezokeramicheskie preobrazovateli: cprav. = Piezoceramic converters : handbook*. Leningrad: Sudostroenie, 1984:256. (In Russ.)
6. Korolev M.V., Karpel'son A.E. *Shirokopolosnye ul'trazvukovye p'ezopreobrazovateli = Broadband ultrasonic piezoelectric converters*. Moscow: Mashinostroenie, 1982:157. (In Russ.)
7. Sharapov V.M., Musienko M.P., Sharapova E.V. *P'ezoelektricheskie datchiki = Piezoelectric sensors*. Moscow: Tekhnosfera, 2006:632. (In Russ.)
8. Sharapov V.M., Minaev I.G., Sotula Zh.V., Kunitskaya I.G. *Elektroakusticheskie preobrazovateli = Electroacoustic converters*. Moscow: Tekhnosfera, 2013:296. (In Russ.)
9. Konovalov S.I., Kuz'menko A.G. *Osobennosti impul'snykh rezhimov raboty elektroakusticheskikh p'ezoelektricheskikh preobrazovateley = Features of pulsed modes of operation of electroacoustic piezoelectric converters*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2014:294. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Ильич Коновалов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроакустики
и ультразвуковой техники,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5)
E-mail: sikonovalov.eut@gmail.com

Sergey I. Konovalov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of electroacoustics and ultrasonic engineering,
St. Petersburg, Russia Electrotechnical University
«LETI» named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia)

Роман Сергеевич Коновалов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроакустики
и ультразвуковой техники,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5);
доцент кафедры методов и приборов
неразрушающего контроля,
Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
(Россия, г. Санкт-Петербург,
Московский просп., 9)
E-mail: rskonovalov.eut@gmail.com

Roman S. Konovalov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of electroacoustics and ultrasonic engineering,
St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»
named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia);
associate professor of the sub-department
of methods and devices for nondestructive testing,
Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University
(9 Moskovsky avenue, St. Petersburg, Russia)

Валерий Михайлович Цаплев

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры электроакустики
и ультразвуковой техники,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5)
E-mail: valery@convergences-fr.ru

Valeriy M. Tsaplev

Doctor of technical sciences, professor, professor
of the sub-department of electroacoustics
and ultrasonic engineering,
St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»
named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia)

Зафар Мухамедович Юлдашев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой биотехнических систем,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5)
E-mail: yuld@mail.ru

Zafar M. Yuldashev

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department
of biotechnical systems,
St. Petersburg Electrotechnical University «LETI»
named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(5 Prof. Popova street, St. Petersburg, Russia)

Дмитрий Иванович Нефедьев

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Dmitriy I. Nefed'ev

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 05.05.2022

Поступила после рецензирования/Revised 04.06.2022

Принята к публикации/Accepted 06.06.2022