

К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ЭХОГРАММ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ДЕФЕКТОСКОПА

© 2021 г. А.В. Мартыненко^{1,*}, В.П. Ермаченко

¹ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», Россия 142103 Подольск, ул. Железнодорожная, 24
E-mail: atilla123@ya.ru

Поступила в редакцию 01.07.2021; после доработки 01.07.2021;
Принята к публикации 13.07.2021

Эхограмма ультразвукового импульсного дефектоскопа рассмотрена как автосвертка акустического сигнала, излученного в нагрузку и принятого демпфированной пьезопластиной. Реконструкция акустического сигнала позволяет определить дрейф коэффициентов отражения ультразвуковых колебаний на границах пьезопластина—нагрузка и пьезопластина—демпфер, например, при поверке пьезопреобразователей при изготовлении, в эксплуатационных условиях. Предлагается методика оценки чувствительности преобразователя.

Ключевые слова: УЗ преобразователь, автосвертка, реконструкция, чувствительность, разрешение, протектор.

DOI: 10.31857/S0130308221080030

В [1] приведена методика расчета импульсной характеристики или излученного ультразвукового импульса иммерсионного ультразвукового преобразователя (далее по тексту — преобразователь) как реакции на короткий (полуволновый или более короткий) электрический возбуждающий импульс в зависимости от акустических сопротивлений (далее по тексту — АС): среды Z_{cp} , пьезоэлемента $Z_{пэ}$, демпфера $Z_{д}$, протектора $Z_{пр}$. Отмечено совпадение излученных импульсов: расчетного и экспериментального, принятого широкополосным преобразователем (далее по тексту — ШП). В данной статье (далее по тексту, для лучшего восприятия) единица измерения акустического сопротивления (МПа·с/м) приводиться не будет.

Положительной стороной методики можно считать возможность определения АС сред с учетом реальной конструкции преобразователя и при использовании серийных дефектоскопов. Отрицательной стороной методики является влияние на результат импульсной характеристики ШП.

Устранить указанный недостаток возможно за счет реализации схемы на отражение. Однако для решения поставленной задачи необходима математическая модель эхоимпульса, то есть: как из излученного импульса в преобразователе формируется эхоимпульс (прямая задача) и, соответственно, основываясь на этой модели, как из эхоимпульса восстановить (реконструировать) излученный импульс (обратная задача). Стоит отметить, что прямая задача исследователями не изучена, хотя в дефектоскопии обратные задачи в настоящее время представляют большой интерес, что обусловлено перспективой получения более подробной информации о дефектах, улучшением разрешающей способности аппаратуры, возможностью более точной локализации несплошностей [2, 3].

При описании режима приема [4] обычно ограничиваются пояснением, что «в режиме приема упругих волн все процессы режима излучения сохраняются. Различие заключается в том, что в режиме приема вынуждающей силой является поступающая из акустической нагрузки упругая волна». Другими словами говорится о том, что при воздействии на преобразователь упругой волны с длительностью менее половины периода собственных колебаний исследуемого преобразователя на его выводах формируется импульсная характеристика (как, например, на рис. 1а для преобразователя без демпфера) [5]. Однако на вход преобразователя воздействует не единичный акустический импульс, а серия акустических импульсов с разной полярностью, амплитудой и задержкой в виде импульсной характеристики преобразователя на излучение, приведенной на рис. 1б [1]. Это и является причиной того, что форма, амплитуда, длительность эхоимпульса будет другой и не соответствовать эхоимпульсу представленному на рис. 1а. На рис. 1 приведены экспериментальные импульсные характеристики преобразователя на прием (см. рис. 1а) и на излучение (см. рис. 1б) как реакции преобразователя на короткий акустический и электрический импульсы соответственно. Отметим, что визуально характеристики на излучение и прием идентичны.

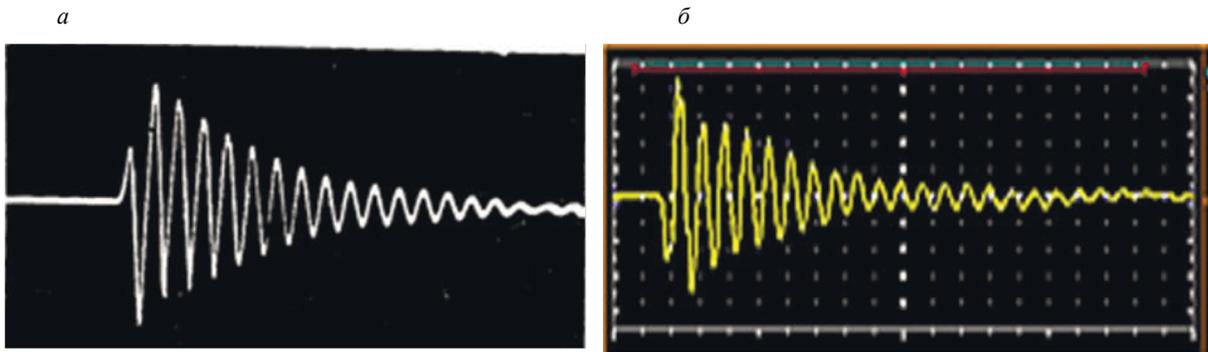


Рис. 1. Импульсные характеристики преобразователя:
a — на прием; *б* — на излучение.

Прием предельно демпфированным преобразователем

Рассмотрим важный для многих акустических задач пример приема предельно демпфированным преобразователем (см. рис. 2). На сегодняшний день в литературе практически отсутствуют объяснения механизма преобразования формы, амплитуды и длительности излученного импульса представленного на рис. 2*a* [1, 5] и состоящего из одного периода синусоиды в эхоимпульс (эхограмму), форма которого приведена на рис. 2*б* [6].

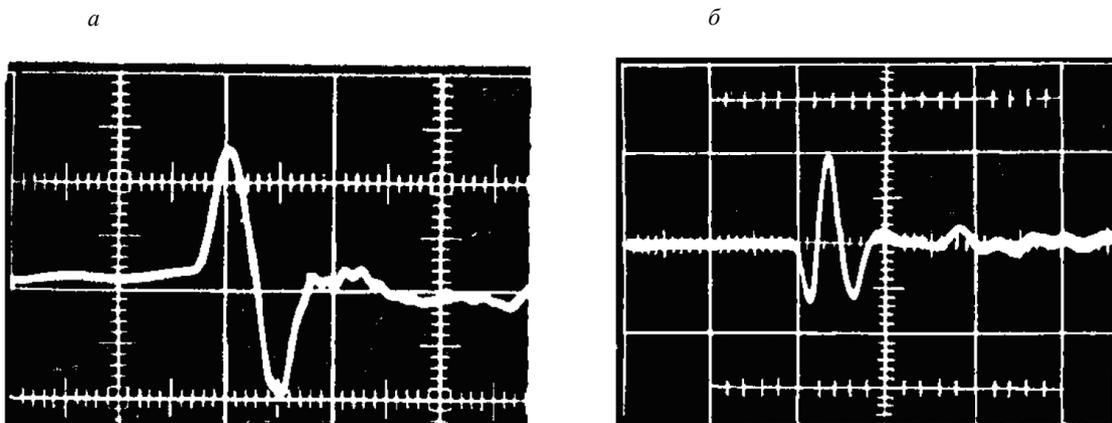


Рис. 2. Осциллограммы для предельно демпфированного полуволнового преобразователя при:
a — излученного акустического импульса; *б* — эхоимпульса (масштаб по горизонтали: *a* — 100 нс/см, *б* — 450 нс/см).

На рис. 3 предлагается графическая модель процесса формирования эхоимпульса. Коричневым цветом на рис. 3 выделена реакция преобразователя на первый полупериод излученного импульса из рис. 2*a*. Через половину периода появится реакция преобразователя на второй полупериод с противоположной полярностью из рис. 2*a* (на рис. 3 выделена синим цветом). По мере появления реакций преобразователя на полупериоды излученного импульса происходит суперпозиция двух импульсов H_i и H_z (кривая Y_p выделена красным цветом) или кривая Y_i — это текущее значение площади под кривой суммы реакций на все полупериоды с учетом их амплитуды, полярности и задержки. При измерении по нулевому уровню длительность эхограммы Y_i увеличивается в два раза относительно длительности излученного импульса H_i (см. рис. 2*a*), что объясняет ухудшение разрешающей способности при приеме и создает возможность ее улучшения при реконструкции. Вместе с тем при приеме происходит увеличение амплитуды в два раза. Это позволяет ввести новое понятие — коэффициент усиления по амплитуде K_y , как отношение мак-

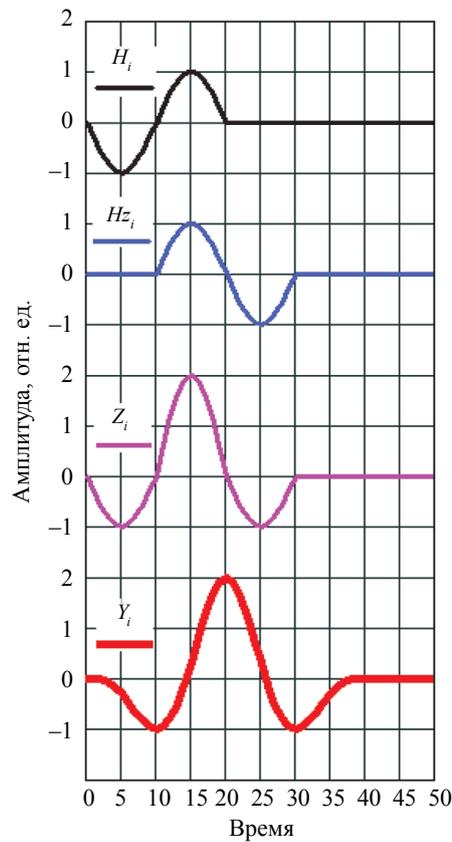


Рис. 3. Формирование эхоимпульса для предельно демпфированного преобразователя:

H_i — принятый электрический импульс при воздействии первого полупериода (выделен черным цветом); H_{z_i} — принятый электрический импульс при воздействии второго полупериода (выделен синим цветом); Z_i — сумма H_i и H_{z_i} (выделен розовым цветом); Y_i — эхоимпульс как суперпозиция H_i и H_{z_i} (выделен красным цветом).

симального значения эхоимпульса (кривой Y_i) к значению амплитуды первого полупериода излученного импульса (кривой H_i). Таким образом, $K_y = 2$ для предельно демпфированного преобразователя с $Z_d = Z_{пз}$.

Прием преобразователями без протектора

Таким же способом можно построить эхограммы для преобразователей с другим Z_d , например, для $Z_d = 0$ (недемпфированного, выделен синим цветом) с $Z_d = 2,3$ (выделен красным цветом) и $Z_d = 4,6$ (выделен черным цветом) (см. рис. 4). При этом значение АС пьезоэлемента $Z_{пз} = 27$, среды $Z_{ср} = 1,5$. Значения амплитуд полупериодов эхограммы нормированы относительно амплитуды первого полупериода, на амплитуду которого не влияют отраженные в преобразователе импульсы. При этом максимальное значение эхограммы или коэффициент усиления K_y для преобразователя с $Z_d = 0$ составило $K_y = 29,75$ для $Z_d = 2,3$ — 11,97. Таким образом, каждому преобразователю, как некоему «своеобразному электромеханическому трансформатору электрического напряжения» [5] соответствует свой Z_d и, соответственно, свой коэффициент усиления K_y . Хотя, как понятно из вышесказанного, преобразователь следует характеризовать не как «трансформатор» (преобразователь без увеличения мощности), а как синфазный накопитель энергии (конволотор).

На рис. 4 экспериментальные эхоимпульсы для преобразователя с $Z_d = 2,3$ приведены справа вверху и для преобразователя с $Z_d = 7$ справа внизу, которые по форме и амплитуде хорошо совпадают с расчетными импульсами, выделенными на рис. 4 красным и черным цветом соответственно.

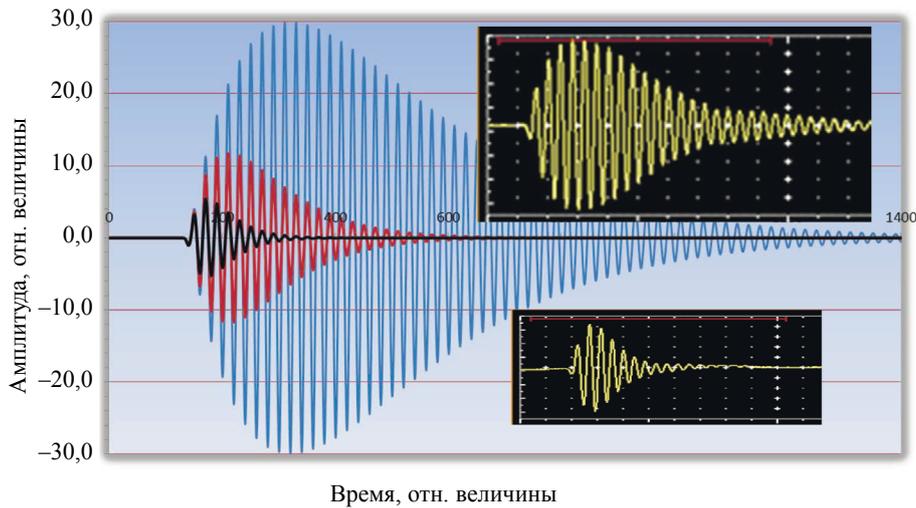


Рис. 4. Расчетные (слева) эхоимпульсы для пьезоэлемента с $Z_{пз} = 27$ и демпфером с Z_d , равным: 0 — выделен синим цветом; 2, 3 — красный цвет; 7 — черный цвет. Справа вверху и внизу на черном фоне приведены экспериментальные эхоимпульсы.

Методика расчета чувствительности преобразователя

При проектировании преобразователя необходимо оценить значение его чувствительности. Известные методики [4, 7] не учитывают наличие K_y при приеме. Предлагается ввести в расчет чувствительности значение K_y , тогда чувствительность можно записать как

$$K = K_{пн} + K_{пр} + K_y + K_o,$$

где $K_{пн}$ — коэффициент, учитывающий преобразование электрического импульса в акустический и обратно; $K_{пр}$ — коэффициент, учитывающий потери на прохождение акустического импульса в иммерсионную среду (воду) и обратно в пьезоэлемент; K_o — коэффициент отражения от металлического отражателя. Далее, основываясь на измерении чувствительности K по ГОСТ 23702—90 [8] преобразователя без протектора, изготовленного из одной пьезопластины от партии пластин, и зная K_y , определяем $K_{пн}$ для данной пьезокерамики партии пьезопластин проектируемого преобразователя, например, с протектором.

Пример практического использования методики

Рассмотрим иммерсионные преобразователи с протектором и без протектора с $Z_{пр} = Z_d = 4,6$, пьезоэлементом с $Z_{пз} = 27$, диаметром 15 мм. Чувствительности, определенные по ГОСТ 23702—90, составляют $-22,5$ и $-24,44$ дБ [9]. Коэффициенты усиления 14,62 и 18,03 дБ определены из рис. 7а работы [9] и из рис. 4 данной работы соответственно. $K_{пр}$ для преобразователя с протектором равен произведению коэффициентов прохождения из пьезоэлемента в протектор и из протектора в иммерсионную среду (вода), то есть: $K_{пр} = 4 \times Z_{пз} \times Z_{пр} / (Z_{пз} + Z_{пр})^2 \times 4 \times Z_{пр} \times Z_{ср} / (Z_{пр} + Z_{ср})^2 = -8,65$ дБ. Для преобразователя без протектора $K_{пр}$ равен произведению коэффициентов прохождения из пьезоэлемента в иммерсионную среду (вода), то есть: $K_{пр} = 4 \times Z_{пз} \times Z_{ср} / (Z_{пз} + Z_{ср})^2 = -14$ дБ. Коэффициент отражения от металлического отражателя равен $K_o = (Z_{ср} - Z_o) / (Z_{ср} + Z_o) = -0,57$ дБ. Полученные данные сведены в табл. 1. Значение $K_{пн} = -27,9$ дБ для пьезопластины указанных размеров и материала можно использовать для расчета K преобразователя с другой конструкцией, например, преобразователя без протектора. В результате оценка значения чувствительности для преобразователя без протектора составляет $K = -24,44$ дБ и совпадает с измеренным значением чувствительности. Стрелками в табл. 1 показан ход расчетов при оценке чувствительности преобразователя (ход расчетов может быть проведен и в обратную сторону, а также для определения недостающего коэффициента).

Данные, приведенные в табл. 1, позволяют объяснить, почему преобразователь без протектора, который, как известно, считается самым чувствительным имеет более низкое значение K , чем у

Таблица 1

Коэффициент	Значение, дБ Для преобразователя с протектором	Значение, дБ Для преобразователя без протектора	Разница значений, дБ
K	-22,5	-24,44	1,94
K_{np}	-8,65	-14,0	5,35
K_o	-0,57	-0,57	
K_y	+14,62	+18,03	3,41
K_{np}	-27,9	-27,9	

преобразователя с протектором. Чувствительность преобразователя с протектором составляет -22,5 дБ, что выше преобразователя без протектора на 1,94 дБ (см. табл. 1). Эта величина образовалась за счет разности, полученной от улучшения условий прохождения акустического импульса из пьезоэлемента в иммерсионную среду и обратно на 5,35 дБ, с одной стороны, и снижения коэффициента усиления при приеме демпфированным преобразователем с протектором на 3,41 дБ, с другой стороны.

Прием преобразователем с протектором

На рис. 5 приведен графический процесс построения эхограммы для преобразователя с протектором. Используется излученный импульс (верхний импульс (1) на рис. 5), заимствованный из работ [1, 9]. Этот импульс представлен без изменения и является реакцией преобразователя на первый полупериод такого же, но излученного, акустического импульса с амплитудой, принятой за единицу. Через время, равное половине периода, представлен второй электрический импульс (2), как реакция преобразователя на второй полупериод акустического импульса с относительной амплитудой -2,0, поэтому фазы полупериодов импульса изменены, а амплитуды — увеличены в 2 раза. Еще через полпериода на выводах преобразователя возникает третий электрический импульс (3) как реакция преобразователя на третий полупериод с амплитудой 1,76 и так далее. Форма теоретического эхоимпульса — (7). Рядом, справа от максимумов полупериодов, приведены относительные значения амплитуд.

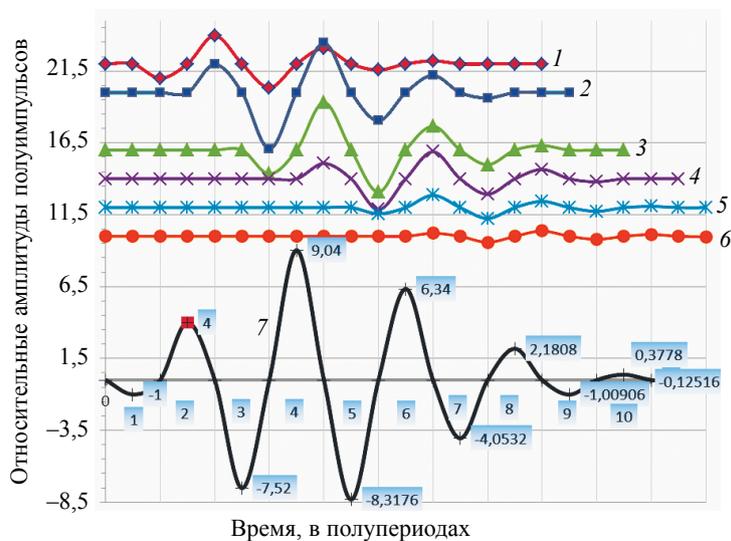


Рис. 5. Графическое представление процессов, происходящих в преобразователе при приеме. Верхние шесть импульсов (1—6) — реакции преобразователя на шесть полупериодов излученного импульса. Седьмой импульс (7) — результирующий импульс (эхограмма).

Экспериментальная проверка

В качестве экспериментального эхоимпульса использован эхоимпульс из рис. 7а работы [9], который представляет эхоимпульс с выхода преобразователя и который приведен в данной работе в правом верхнем углу на черном фоне рис. 6. Этот эхоимпульс также представлен в левой части рис. 6 в виде эхоимпульса, выделенного красным цветом (2), с амплитудами нормированными относительно первого полупериода. Значения относительных амплитуд приведены справа от максимумов полупериодов и экспериментальное $K_y = 14,62$ дБ. На экспериментальный эхоимпульс наложен из рис. 5 теоретический импульс и выделен синим цветом (1). Как видно из рис. 6, по форме и по длительностям теоретический и экспериментальный эхоимпульсы хорошо совпадают. Снижение амплитуд для экспериментального по сравнению с теоретическим эхоимпульсом объясняется затуханием в протекторе, непараллельностью плоскостей пьезопластины, протектора, имеются места пайки контактов.

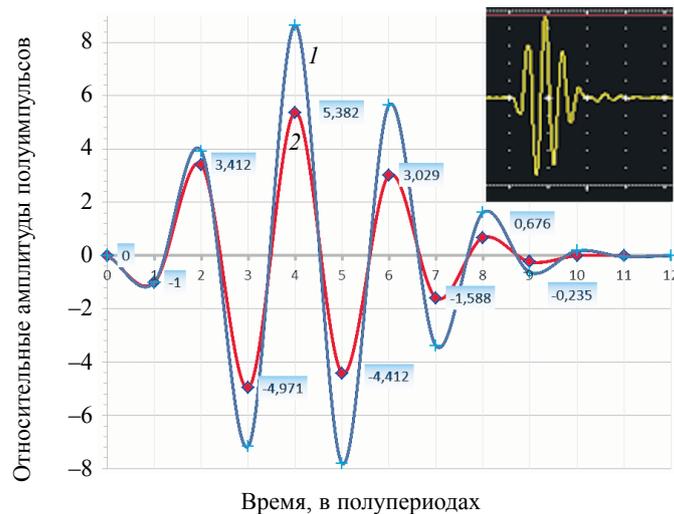


Рис. 6. Эхограммы: теоретическая (1); экспериментальная (2).

Прием преобразователем с протектором с АС $Z_{пр} = \sqrt{Z_{ср} \times Z_{пз}}$

На рис. 7а приведен расчетный излученный импульс из работы [9]. На рис. 7б для этого импульса приведен эхоимпульс, построенный графическим способом, как описано выше, и выделен синим цветом. Отметим его особенность — из-за компенсации части реакций преобразователя на излученный импульс при графическом построении эхоимпульса относительная амплитуда 7 полупериода становится равной 0,13, что фактически «разбивает» его на два импульса разной амплитуды и полярности, следующих друг за другом. Данный факт позволяет объяснить «двугорбость» амплитудно-частотной характеристики (спектра), так как наличие второго импульса с таким соотношением амплитуд приводит к образованию линейчатого спектра такого «двугорбого» вида. Данный вид спектра, конечно, позволяет расширить полосу пропускания, рассчитанную по уровню 0,7 от максимума спектра, однако это достигается за счет «дробления» импульса и фактически за счет увеличения его длительности, то есть

ухудшения разрешения. Известно, что для линейчатого спектра разность частот между его линиями обратно пропорциональна временному расстоянию между импульсами. Из рис. 7б временное расстояние между импульсами 1 и 2 составляет 8 полупериодов, обратная величина от которого при эффективной частоте эхоимпульса 4 МГц составляет 1 МГц, что совпадает с экспериментальными данными — с разностью частот между «горбами» (см. спектр в правой верхней части рис. 7б). Красной пунктирной линией на рис. 7б отмечен «недробленный» эхоимпульс от демпфированного пьезоэлемента, имеющий «одногорбый» спектр. С учетом сказанного выше, авторы не рекомендуют подобный способ для повышения разрешения преобразователя.

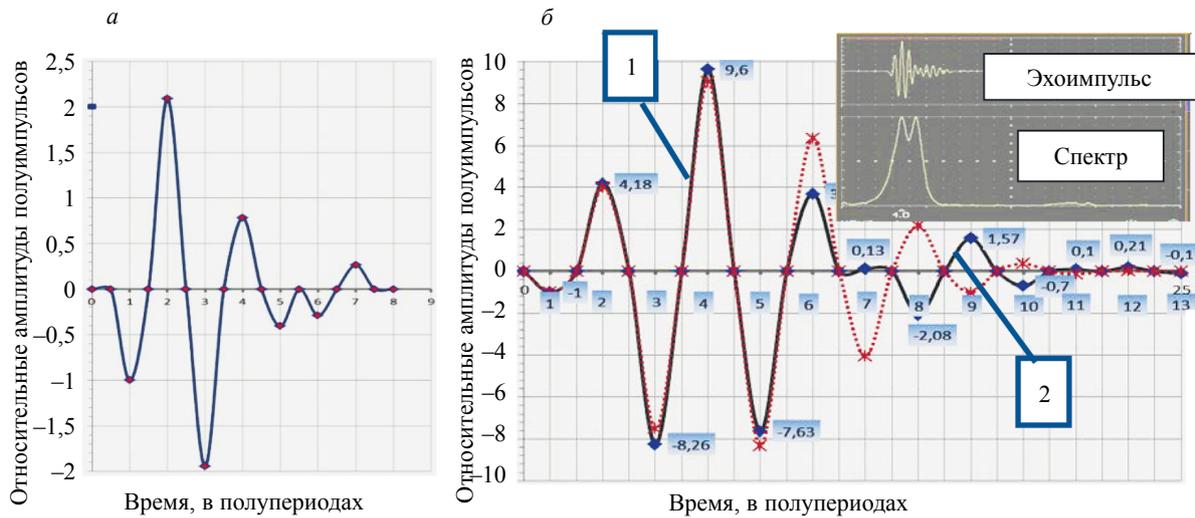


Рис. 7. Формы импульсов для преобразователя с протектором $Z_{пр} = \sqrt{Z_{ср} \times Z_{из}}$: *a* — излученного, расчетного; *б* — эхоимпульс расчетный с двугорбым спектром (выделен синим цветом, эхоимпульс с одnogорбым спектром выделен красным пунктиром, в правом верхнем углу экспериментальный эхоимпульс и его спектр).

Эхоимпульс как автосвертка

Будем исходить из того, что операция получения результирующего сигнала по исходному называется сверткой (convolution) и любая линейная система, а в рассматриваемом случае преобразователь, осуществляет свертку входного сигнала со своей импульсной характеристикой [5, 10].

Обозначим значком \otimes операцию свертки, входной сигнал поступающий на вход приемного преобразователя как X , его импульсную характеристику как R , тогда выходной эхоимпульс Y или эхограмму можно представить в виде $Y = X \otimes R$. При этом излученный импульс X представляет собой свертку электрического дельта-импульса D , подаваемого на излучающий преобразователь с импульсной характеристикой преобразователя R или $X = D \otimes R$. Значение дельта импульса D равно 1, тогда $X = R$, что означает тождественность излученного импульса импульсной характеристике преобразователя на излучение. Далее излученный импульс $X = R$ поступает на вход преобразователя. При тождественности импульсных характеристик преобразователей эхограмма $Y = R \otimes R$. В схеме на отражение, в общем случае, происходит операция свертки X с импульсными характеристиками отражателей HO и $X = R \otimes HO$. При отражении от металлической стенки HO можно принять равной 1 и эхограмма $Y = R \otimes R$.

Таким образом, эхограмма является автосверткой импульсной характеристики преобразователя. Решая обратную задачу, получаем экспериментальную импульсную характеристику преобразователя R . При решении обратной задачи наибольшие трудности могут возникнуть при получении фазочастотной характеристики, которая обычно представляется характеристикой с фиктивными скачками размером 2π [11, 12], что затрудняет понимание и влияет на решение обратной задачи. Ниже решение этих задач рассмотрено более подробно.

Структура акустического сигнала, излученного пьезопреобразователем импульсного ультразвукового дефектоскопа достаточно проста и, как показал М. Редвуд [13], при возбуждении демпфированной пьезопластины коротким электрическим импульсом в нагрузку излучается серия акустических эквидистантных импульсов (в дальнейшем называемая редвудовской серией и обозначаемая как R -серия), относительные значения амплитуд которых составляют последовательность:

$$-1, (1 + w), -(1 + v)w, (1 + w)vw, -(1 + v)vw^2, (1 + w)v^2w^2, \dots, \quad (1)$$

где v, w — коэффициенты отражения по давлению на границах пьезопластина—нагрузка и пьезопластина—демпфер соответственно.

Заметим, что как положительные импульсы, так и отрицательные, начиная со второго, убывают с одинаковой скоростью, определяемой множителем $vw < 1$, следовательно, сумма амплитуд положи-

тельных импульсов как сумма членов убывающей геометрической прогрессии равна $(1+w)/(1-vw)$ и совпадает с суммой амплитуд отрицательных импульсов $-[1+(1+v)w/(1-vw)] = -(1+w)/(1-vw)$ и в целом сумма амплитуд R -серии равна нулю. Таким образом, начиная с первого положительного импульса, отношение амплитуд любых двух последовательных однополярных импульсов (последующего к предыдущему) равно произведению $Q = vw$, а отношение амплитуды любого отрицательного импульса к амплитуде предыдущего положительного импульса составляет величину $q = (1+v)w/(1+w)$. При экспериментальном определении указанных отношений Q и q получаем выражения для коэффициентов отражений:

$$w = (q - Q) / (1 - q), \quad (2)$$

$$v = Q(1 - q) / (q - Q).$$

Кроме того, легко показать, что огибающие серии определены выражениями:

$$y1_i = (1 + w) (vw)^{(i-h)/T}, \quad (3)$$

$$y2_i = (1 + v) w^{0,5} v^{-0,5} (vw)^{(i-h)/T},$$

где $y1$ — огибающая положительных импульсов; $y2$ — огибающая для отрицательных импульсов начиная со второго отрицательного; h — отсчет первого положительного импульса серии; T — расстояние в отсчетах i между импульсами одной полярности (соответствует времени двойного прохода УЗ импульса в пьезопластине); $h - T/2$ — отсчет начала серии (отрицательного импульса единичной амплитуды).

На рис. 8 приведена серия A_i ($h = 100$, $T = 100$, размер массива данных $2^{14} = 16384$), при расчете которой принято, что коэффициенты отражения ультразвуковых колебаний на границах пьезопластины определяются АС: среды $Z_{cp} = 1,5$ (вода), пьезоэлемента $Z_{пз} = 27$ (пьезокерамика ЦТС19), демпфера $Z_d = 4,7$ (компаунд на полимерной связке с порошковым металлическим наполнителем). При электрическом импульсе возбуждения серия приобретает привычный вид (рис. 9).

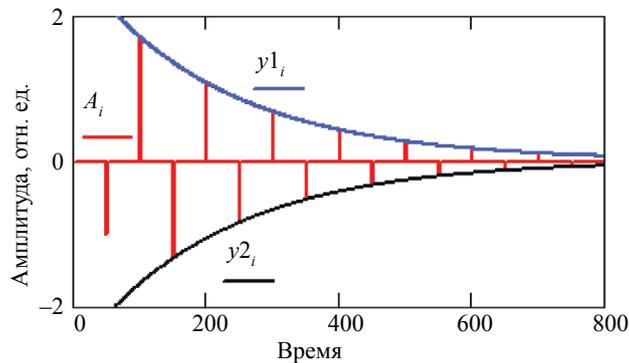


Рис. 8. Расчетная серия акустических эквидистантных импульсов, излучаемая преобразователем с $Z_{пз}=27$, $Z_d=4,7$ в воду.

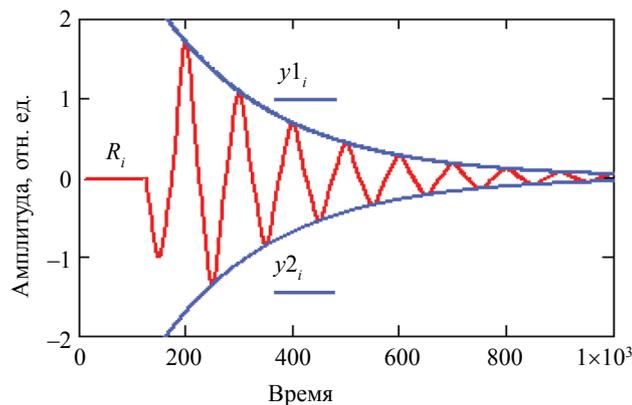


Рис. 9. R -серия при возбуждении электрическим импульсом гауссовской формы.

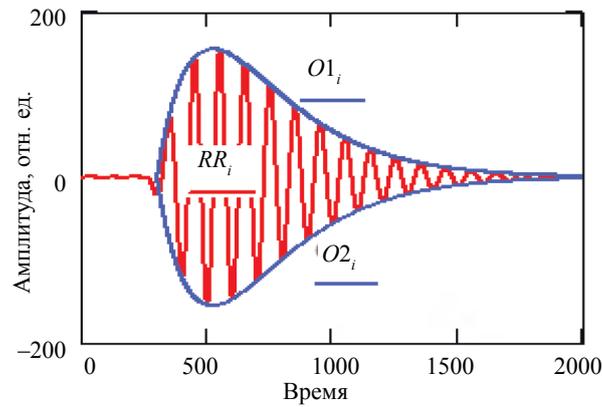


Рис. 10. Эхограмма RR как автосвертка R -серии. Огибающие автосвертки $O1$, $O2$ являются автосвертками огибающих $y1, y2$.

В представлении рис. 8 R -серия является импульсной характеристикой и, следовательно, в режиме ее приема тем же преобразователем эхограмму дефектоскопа можно рассматривать как автосвертку R -серии [10].

На рис. 10 приведены автосвертка R -серии (красный цвет) и автосвертки огибающих (синий цвет) рис. 9, рассчитанные стандартным образом как обратные фурье-преобразования квадратов соответствующих фурье-преобразований:

$$\begin{aligned} RR &= F^{-1} \{ [F(R)]^2 \}; \\ O1 &= F^{-1} \{ [F(y1)]^2 \}; \\ O2 &= F^{-1} \{ [F(y2)]^2 \}, \end{aligned} \quad (4)$$

где F, F^{-1} — операторы прямого и обратного фурье-преобразования соответственно.

Относительно вида огибающих заметим, что автосвертка функции $y(x) = \exp(-kx)$, $x \geq 0$ есть весьма узнаваемая функция вида $y(x) = x \exp(-kx)$, $x \geq 0$ (линейный начальный рост, максимум на участке выпуклости и убывание после точки перегиба). Она угадывается практически во всех эхограммах, полученных в условиях, сходных с условиями рассматриваемой ситуации [5, 7].

Для определения коэффициентов отражения границ требуется восстановление конфигурации редудовской серии по ее автосвертке.

Поскольку по основной теореме свертки:

$$\begin{aligned} F[R \otimes R] &= \{F[R]\}^2, \text{ то} \\ R &= F^{-1} \left\{ \sqrt{F[R \otimes R]} \right\}. \end{aligned}$$

Представляя спектр автосвертки в виде произведения амплитудного и фазового спектров, имеем:

$$F[R \otimes R] = |F| \exp \left[\sqrt{-1} \arg(F) \right].$$

Восстановленная R -серия записывается в виде:

$$R = F^{-1} \left\{ \sqrt{|F|} \exp \left[\sqrt{-1} \frac{\arg(F)}{2} \right] \right\}. \quad (5)$$

Существенным моментом здесь является переход от функции $\arg(F)$, рассчитываемой как главное значение обратной тригонометрической функции и, следовательно, имеющая фиктивные скачки, к непрерывной функции $\arg(F)$. Этот переход осуществляется, например, с помощью введения вспомогательной мнимой экспоненты, как это предложено в [14].

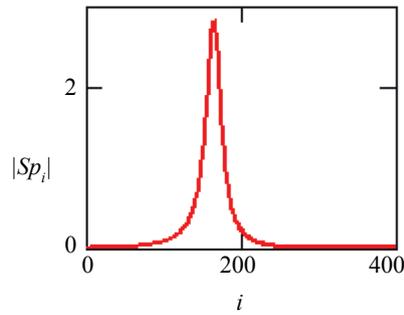


Рис. 11. Амплитудный спектр эхограммы рис. 3.

При численном счете рассматриваемая задача имеет корректное решение лишь для финитных функций с ограниченным спектром. В рассматриваемом примере эти условия выполняются: серия финитна, поскольку при длительности серии 10^3 отсчетов i (6 % от размера массива данных) амплитуда отдельных импульсов уменьшается на два порядка, а амплитудный спектр $|Sp_i|$ (рис. 11) сосредоточен в диапазоне отсчетов 50—250.

На рис. 12а изображен фрагмент фазового спектра φ_i , вычисленный как главное значение обратной тригонометрической функции и, следовательно, имеющий фиктивные скачки размером 2π . Введение мнимой экспоненты позволяет вычислить разность фаз в соседних отсчетах и построить фазовый спектр без скачков Φ_i как интеграл с переменным верхним пределом (рис. 12б).

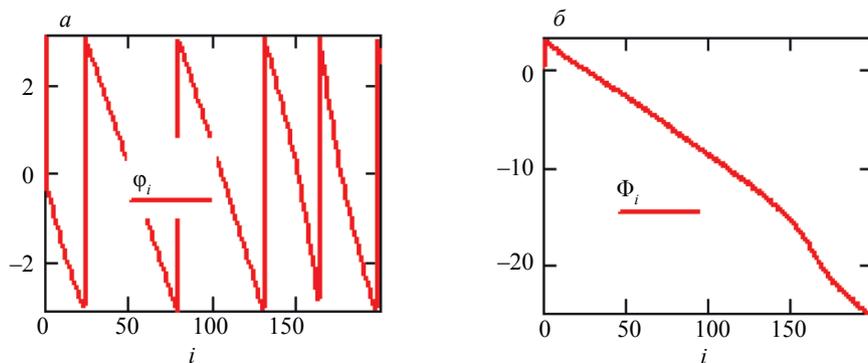
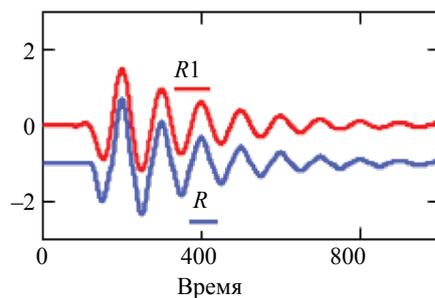


Рис. 12. Фрагменты фазового спектра, вычисленные: а — как главное значение обратной тригонометрической функции; б — как интеграл с переменным верхним пределом.

На рис. 13 приведен результат реконструкции по соотношению (5) R -серии рис. 9 (кривая красного цвета $R1$). Синим цветом отмечена исходная редвудовская серия R (кривая R смещена для удобства визуального сопоставления). Коэффициент корреляции кривых $R1$ и R составляет 0,995.

Рис. 13. Результат реконструкции $R1$ исходной серии R .

Таким образом, зная эхограмму, можно реконструировать излученный импульс и определить действительные значения АС преобразователя. Предложим несколько способов. Первый способ — используя выражения (3). Второй способ — используя выражение (5). Третий способ основывается на определении огибающих $y(x) = O(x)/x$ в выражении (4). Данный способ весьма прост, однако применим для значений Z_d менее 5.

Реконструкция экспериментальных эхограмм

На рис. 14 приведены реконструкции эхограмм от преобразователей без протектора со следующими демпферами с теоретическими значениями Z_d : 1 — воздух с $Z_d = 0$ (рис. 14а); 2 — вода с $Z_d = 1,5$ (рис. 14б); 3 — глицерин с $Z_d = 2,4$ (рис. 14в); 4 и 5 — компаунд на полимерной связке с разной величиной наполнителя и с разными Z_d (рис. 14г, рис. 14д). На рис. 14д в правой части приведена экспериментальная эхограмма данного преобразователя, сравнивая которую с реконструкцией $R1$ (излученным импульсом) нетрудно заметить выигрыш в разрешающей способности.

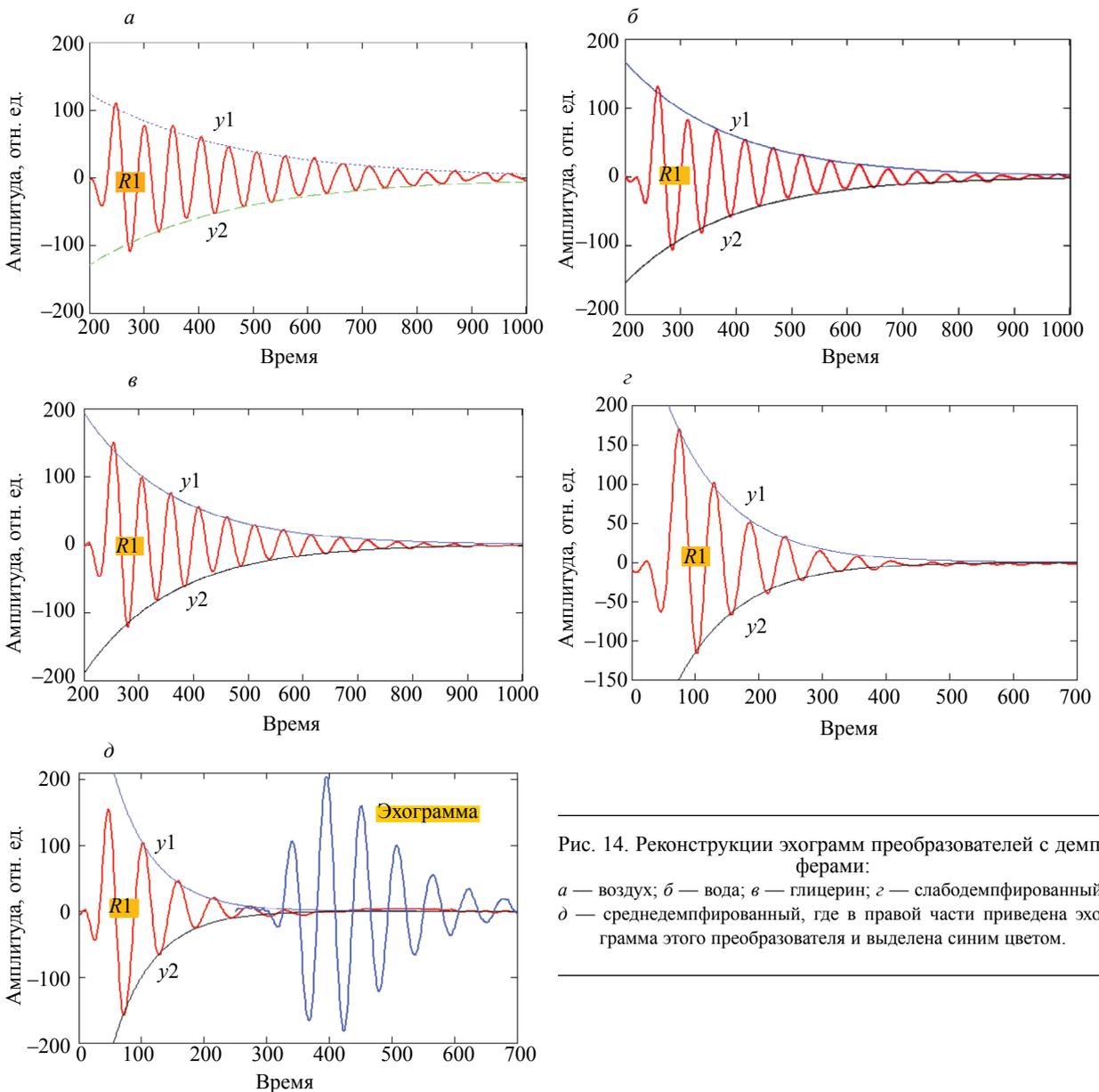


Рис. 14. Реконструкции эхограмм преобразователей с демпферами:
 а — воздух; б — вода; в — глицерин; г — слабодемпфированный;
 д — среднелемпфированный, где в правой части приведена эхограмма этого преобразователя и выделена синим цветом.

Для изготовления преобразователей использовалась пьезопластина из ЦТС-19 с $Z_{пз} = 22,5$, толщиной 0,5 мм, закрепленная по торцевой поверхности в корпусе. К электродам пьезопластины припаивались выводы. Внутри корпуса, в качестве демпфера помещались указанные выше среды. Электрическое согласование (добавление внешних электрических элементов) во всех экспериментах не использовалось. Эхограмма с выводов преобразователя поступала на вход дефектоскопа USD-60 производства фирмы «Кропус», в котором она преобразовывалась в цифровой код, который затем поступал в среду программы «Mathcad», где и осуществлялись приведенные выше преобразования.

Для всех преобразователей иммерсионной средой или нагрузкой была вода, поэтому наиболее интересен эксперимент (см. рис. 14б), когда условия с обеих сторон пьезопластины преобразователя одинаковы, то есть $Z_{ср} = Z_{д}$. При $Z_{пз} = 22,5$ и $Z_{ср} = Z_{д} = 1,6$, которое было принято за действительное АС и использовалось для определения действительных значений АС сред демпферов преобразователей.

Определение действительного АС

На первом этапе — по реконструкциям кривых эхограмм определяется среднее значение $Q = V*W$ путем подбора количества анализируемых пар полуволн с учетом среднеквадратичного отклонения этого произведения, позволяющего отсекаать выпадающие значения.

На втором этапе, рассчитав значение V при $Z_{ср} = 1,6$, $Z_{пз} = 22,5$, определяется значения W и далее $Z_{д}$. Получены следующие действительные значения АС демпферов: воздуха — 0,70; глицерина — 2,25; компаунда на полимерной связке с небольшим весовым процентом порошкового металлического наполнителя (слабодемпфированный преобразователь) — 4,66; компаунд на полимерной связке со средним весовым процентом порошкового металлического наполнителя (среднедемпфированный преобразователь) — 7,38.

Для каждой реконструкции на рис. 14, используя выражения (3), построены огибающие y_1 и y_2 для полученных АС и выделены синим цветом. Можно заметить расхождение реконструкции и их огибающих только для среднедемпфированного преобразователя (см. рис. 14д) с $Z_{д} = 7,38$, что согласуется с условием применения метода огибающих, при котором $Z_{д} \leq 5$.

При сравнении теоретических и действительных АС наиболее заметно отличие для «воздушного» демпфера, которое объяснимо влиянием конструкции преобразователя (узел крепления пьезопластины, контакты) на степень демпфирования, что необходимо учитывать при проектировании преобразователей.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Выше приведено решение прямой задачи или показано как, зная конструкцию и значения АС сред, можно определить (предсказать) эхограмму. Также приведено решение обратной задачи, а именно: как, зная эхограмму, реконструировать излученный импульс и определить значения АС сред преобразователя. Для ультразвуковых исследований (дефектоскопии, гидролокации, медицины) это наиболее интересная и востребованная задача, один из важных результатов которой — повышение разрешения при сохранении чувствительности [15].

ВЫВОДЫ

1. Предложена модель работы преобразователя в режиме приема. Получено математическое выражение для эхоимпульса.
2. Показана теоретическая и практическая возможность реконструкции излученного импульса.
3. Приведены практические примеры оценки чувствительности преобразователя, акустических сопротивлений его материалов, повышения разрешения при сохранении чувствительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мартыненко А.В. К вопросу о возможности повышения чувствительности и разрешения иммерсионного пьезоэлектрического преобразователя // Дефектоскопия. 2015. № 7. С. 3—12.
2. Бархатов В.А. Восстановление распределения отражателей по дальности. Обращение свертки эхосигналов // Дефектоскопия. 2003. №6. С.10—28.
3. Бархатов В.А. Экспериментальное исследование решений одномерной обратной акустической задачи // Дефектоскопия. 2012. № 12. С. 55—64.

4. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. Ермолова И.Н. М.: Изд-во Машиностроение, 1986. 280 с.
5. *Домаркас В.Й., Кажис Р.-Й.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Изд-во Минтис, 1975. 255 с.
6. *Королев М.В., Карпельсон А.Е.* Широкополосные ультразвуковые пьезопреобразователи. М.: Изд-во Машиностроение, 1982. 157 с.
7. *Ермолов И.Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. М.: Изд-во Машиностроение, 1981. 240 с.
8. ГОСТ 23702—90. Контроль неразрушающий. Преобразователи ультразвуковые. Методы испытаний. М.: Изд-во Госстандарт СССР, 1991. 57 с.
9. *Мартыненко А.В.* Иммерсионный пьезоэлектрический преобразователь с улучшенными характеристиками // Дефектоскопия. 2015. № 8. С. 3—13.
10. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. В 2-х томах. Пер. с франц. М.: Изд-во Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
11. *Коновалов С.И., Кузьменко А.Г.* Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Изд-во Политехника, 2014. 294 с.
12. *Григорьев М.А., Толстиков А.В., Навроцкая Ю.Н.* Коэффициент передачи многослойного пьезопреобразователя при прямом и обратном преобразовании // Акустический журнал. 2002. Т. 48. № 2. С. 187—194.
13. *Redwood M.* A study of waveform in the generation and detection of short ultrasonic pulses // Journ. Appl. Mater. Research. 1963. V. 2. P. 76—84.
14. *Зверев В.А., Стромков А.А.* Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: Изд-во ИПФ РАН, 2001. 188 с.
15. *Мартыненко А.В., Ермаченко В.П.* Способ ультразвукового контроля материалов и изделий. Заявка на выдачу евразийского патента на изобретение № 2021114521 от 21.05.2021, МПК⁸G01N 29/00.