



УДК 681.883.67.001.24

Р. С. Коновалов, С. И. Коновалов, А. Г. Кузьменко
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Об определении длительности и амплитуды зондирующего импульса на выходе пьезопреобразователя с учетом его конструктивных особенностей

Рассматривается пластинчатый пьезокерамический преобразователь, нагруженный через систему переходных слоев на твердую среду. Наличие переходных слоев обусловлено необходимостью создания акустического контакта между объектом контроля и преобразователем (слой 1), применением протектора (слой 2) и присутствием клеевого соединения между излучающей поверхностью пластины и протектором (слой 3). Тыльная сторона пластины контактирует с демпфером. На основе методики, предложенной в предшествующих работах авторов, изложен алгоритм расчета частотной характеристики преобразователя и проведено исследование импульсного режима работы излучателя в предположении, что активный элемент возбуждается импульсом электрического напряжения в виде одного полупериода синусоиды на частоте антирезонанса пластины. Осуществлены оценочные расчеты толщин слоев для конкретной рабочей частоты преобразователя, на основании чего выполнены расчеты для ряда волновых толщин слоев, реально встречающихся в практике ультразвукового контроля. Расчеты проведены в широком диапазоне значений удельного акустического импеданса протектора.

Пьезоэлектрическая пластина, система переходных слоев, протектор, частотная характеристика, импульсный режим

Интерес, проявляемый разработчиками средств ультразвукового неразрушающего контроля к исследованию импульсного режима работы пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), объясняется стремлением к улучшению столь важных характеристик аппаратуры, как протяженность мертвой зоны, разрешающая способность и точность определения координат дефектов. Достижению указанной цели способствует переход к такому режиму работы аппаратуры, при котором длительность излучаемого акустического сигнала не превышала бы нескольких колебаний высокой частоты. Обеспечение условий, позволяющих достигать столь малой длительности зондирующего импульса, является особенно важным для решения задач прикладной акустики, имеющих локационный характер (например, определение дистанции до объекта, измерение толщины слоев в многослойных материалах, снижение протя-

женности мертвой зоны и др.). Одним из наиболее распространенных способов достижения возможности получения короткого сигнала на выходе ПЭП является их механическое демпфирование. Технология изготовления демпферов в настоящее время достаточно хорошо разработана и широко применяется для расширения полосы пропускания преобразователей. При этом наибольшее применение нашли демпферы с порошковыми наполнителями. В них используются композитные материалы, состоящие из рассеивателей и связующего компонента [1]. Широко применяются порошки тяжелых металлов (например, вольфрама), связанные смолами (чаще всего эпоксидными), компаундами, герметиками или полиуретанами. Требования к удельному акустическому импедансу демпфера не являются очень строгими. Для получения широкой полосы пропускания и коротких переходных процессов

часто вполне достаточно, чтобы удельный акустический импеданс демпфера составлял примерно 0.35 от значения удельного акустического импеданса активного материала [2]. Механический демпфер располагается с тыльной стороны пьезокерамической пластины. Рабочая же сторона активного элемента должна излучать акустические сигналы в исследуемую среду (например, сталь) через систему переходных слоев. Наличие переходных слоев диктуется рядом обстоятельств. Главным среди них является необходимость защиты поверхности пьезоэлемента с нанесенным на нее электродом от механического разрушения при осуществлении сканирования. Такую защиту выполняет переходный слой, именуемый протектором. Между ним и поверхностью объекта контроля необходимо наличие слоя жидкого материала для осуществления акустического контакта, так как в противном случае ПЭП будет нагружен на воздух, что повлечет за собой крайне неблагоприятный режим работы преобразователя. Наконец, между протектором и поверхностью пьезокерамического элемента должен присутствовать клеевой слой, в задачу которого входит обеспечение акустического контакта между двумя упомянутыми средами и создание необходимой механической прочности описываемой конструкции. Протекторы, приклеиваемые к пьезоэлементу, имеют толщину 0.1–0.5 мм и выполняются из кварца, сапфира, бериллия, стали, смол с порошковым наполнителем (корундовый или бериллиевый порошок), ситалла, лигнофоля и др. [3]. При этом могут использоваться различные клеи. В качестве примера можно упомянуть эпоксидный клей ДМ5-65. Он представляет собой композицию на основе эпоксидной диановой смолы ЭД-20, малеинового ангидрида, оксида алюминия, титаната бария и оксида цинка [4]. Клей имеет высокую адгезию к большинству металлических материалов, обладает хорошими электроизоляционными свойствами. Высокое электрическое сопротивление слоя мало меняется при длительном воздействии влаги.

Справедливости ради заметим, что слой клея не всегда является необходимой составной частью конструкции, так как иногда протектор наносится непосредственно на поверхность пластины в виде, например, эпоксидной основы с порошковыми наполнителями (кварцевый песок; бериллиевый или корундовый порошок и т. д.), которая затем полимеризуется, после чего в твердом состоянии протекторный слой шлифовыва-

ется до требуемой толщины. Также стоит отметить, что протекторы могут изготавливаться в виде сменных пленок из эластичных пластмасс (чаще всего из полиуретана) или резины [3]. В этом случае между протектором и пьезоэлементом вводится жидкость. В настоящей статье такой вариант применения протекторов не рассматривается.

Таким образом, в общем случае система переходных слоев между пьезопластиной и объектом контроля представляет собой систему из трех слоев: «клеевой слой–протектор–контактный слой». Совершенно естественно, что такая система переходных слоев оказывает влияние на форму акустического сигнала, который излучается пьезопластиной во внешнюю среду. Решение задачи в упрощенном варианте, т. е. в предположении о малости толщины клеевого соединения, может привести к получению искаженных представлений о форме излучаемого сигнала. Настоящая статья посвящена рассмотрению задачи определения формы зондирующего импульса на выходе многослойного ПЭП с учетом его конструктивных особенностей в наиболее общей постановке с целью применения полученных результатов в неразрушающем контроле.

На рис. 1 приведено схематичное изображение рассматриваемого преобразователя. Пьезопластина (пьезокерамика ЦТС-19) с тыльной стороны в качестве нагрузки имеет демпфер, а рабочая ее сторона нагружена на исследуемую среду через систему переходных слоев. Пусть U – электрическое напряжение, возбуждающее пьезопластину. Введем следующие обозначения: z_H , z_1 , z_2 , z_3 , z_K и z_D – удельные акустические импедансы акустической нагрузки (в качестве акустической нагрузки выбрана сталь), контактного слоя, материала протектора, клеевого соединения, пьезокерамики и демпфера соответственно.

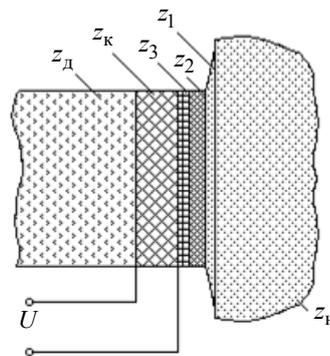


Рис. 1

Частотная характеристика данного многослойного ПЭП может быть определена на основе методики, приведенной в [5], где рассмотрена пьезопластина с согласующим слоем, нагруженная излучающей стороной на водную среду. Тыльная сторона пластины имеет демпфер. Для этого случая с помощью метода эквивалентных схем в [5] получено выражение, определяющее колебательную скорость на выходе пьезопреобразователя:

$$v_{\text{вых}} = -\frac{k_U U}{Z_K} F_{\text{изл}}(x_K), \quad (1)$$

где k_U – коэффициент электромеханической трансформации; U – возбуждающее электрическое напряжение; Z_K – полный акустический импеданс пьезокерамики; x_K – волновая толщина пьезокерамики;

$$F_{\text{изл}}(x_K) = F_1(x_K) k_v. \quad (2)$$

Здесь

$$F_1(x_K) = \frac{A}{B+C}, \quad \text{где } A = 1 - \cos x_K - j \frac{Z_D}{Z_K} \sin x_K;$$

$$B = \left(\frac{Z_D}{Z_K} + \frac{Z_{\text{ВХ}}}{Z_K} \right) \left(\cos x_K - \frac{\beta^2}{x_K} \sin x_K \right);$$

$$C = j \left[\left(1 + \frac{Z_{\text{ВХ}} Z_D}{Z_K^2} \right) \sin x_K - 2 \frac{\beta^2}{x_K} (1 - \cos x_K) \right]$$

(Z_D – полный акустический импеданс демпфера; β – коэффициент электромеханической связи пьезоматериала); $k_v = \frac{1}{\cos x_{\text{сл}} + j \frac{Z_B}{Z_{\text{сл}}} \sin x_{\text{сл}}}$ – ко-

эффициент передачи слоя по колебательной скорости ($x_{\text{сл}}$ – волновая толщина согласующего слоя; Z_B и $Z_{\text{сл}}$ – полные акустические импедансы воды и материала слоя). Параметр $Z_{\text{ВХ}}$ определяется уравнением

$$Z_{\text{ВХ}} = Z_{\text{сл}} \frac{Z_{\text{сл}} \sin x_{\text{сл}} - j Z_B \cos x_{\text{сл}}}{Z_B \sin x_{\text{сл}} - j Z_{\text{сл}} \cos x_{\text{сл}}}.$$

Выражениями (1) и (2) определяется частотная характеристика пьезоэлектрического пластинчатого элемента, имеющего с тыльной стороны демпфер, а с излучающей – слой, предназначенный для согласования работы преобразователя с внешней средой (водой). Полученный в [5] результат может быть использован для решения

задачи об определении частотной характеристики многослойного преобразователя, излучающего сигнал в твердую среду. Совершенно аналогично тому, как это выполнялось в [5] для случая нагрузки на водную среду, можно записать для входного акустического импеданса переходного слоя с номером 1:

$$Z_{\text{ВХ}}^{(1)} = Z_1 \frac{Z_1 \sin x_1 - j Z_H \cos x_1}{Z_H \sin x_1 - j Z_1 \cos x_1},$$

где Z_1 и Z_H – полные акустические импедансы среды с номером 1 и среды, в которую ведется излучение, т. е. являющейся акустической нагрузкой; x_1 – волновая толщина первого слоя.

Теперь можно утверждать, что второй слой оказывается нагруженным на входной акустический импеданс $Z_{\text{ВХ}}^{(1)}$ (входной импеданс слоя с номером 1, который уже нагружен на внешнюю среду):

$$Z_{\text{ВХ}}^{(2)} = Z_2 \frac{Z_2 \sin x_2 - j Z_{\text{ВХ}}^{(1)} \cos x_2}{Z_{\text{ВХ}}^{(1)} \sin x_2 - j Z_2 \cos x_2},$$

где Z_2 представляет собой полный акустический импеданс среды с номером 2 (протектор); x_2 – волновая толщина протекторного слоя.

Аналогично можно записать и для третьего слоя:

$$Z_{\text{ВХ}}^{(3)} = Z_3 \frac{Z_3 \sin x_3 - j Z_{\text{ВХ}}^{(2)} \cos x_3}{Z_{\text{ВХ}}^{(2)} \sin x_3 - j Z_3 \cos x_3},$$

где Z_3 и x_3 – полный акустический импеданс и волновая толщина слоя с номером 3.

Таким образом, задача приведена к виду, при котором пластинчатый элемент в качестве нагрузки имеет, с одной стороны, импеданс демпфера, а с другой – импеданс, определяемый выражением $Z_{\text{ВХ}}^{(3)}$. Для определения частотной характеристики излучателя можно воспользоваться (1) и (2). При решении необходимо еще учесть коэффициенты передачи слоев по колебательной скорости:

$$k_v^{(1)} = \frac{1}{\cos x_1 + j \frac{Z_H}{Z_1} \sin x_1};$$

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

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

Для всех трех рассматриваемых слоев результирующий коэффициент передачи по колебательной скорости может быть определен произведением $k_{v \text{ общ}} = k_v^{(1)} k_v^{(2)} k_v^{(3)}$.

Для проведения дальнейших расчетов представляется удобным выражать волновые толщины слоев, рассматриваемых в данной задаче, через волновую толщину пьезокерамического слоя: $\alpha_1 = x_1/x_k$; $\alpha_2 = x_2/x_k$; $\alpha_3 = x_3/x_k$. Иными словами:

$$\alpha_i = x_i/x_k, \quad (3)$$

где $i = 1, 2, 3$.

Таким образом, предложенный в [5] способ подхода к решению непростой задачи определения частотной характеристики пластинчатого многослойного ПЭП оказался очень удобным для применения в рассматриваемом случае.

Наметив путь решения задачи по определению частотной характеристики исследуемого преобразователя, необходимо перейти к рассмотрению импульсного режима работы ПЭП. Форма импульса колебательной скорости на выходе излучателя может быть определена с помощью преобразования Фурье:

$$v_{\text{ВЫХ}}(t) \sim \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ИЗЛ}}(\omega) F_{\text{ИЗЛ}}(\omega) \exp(j\omega t) d\omega,$$

где $U_{\text{ИЗЛ}}(\omega)$ – выражение, определяющее спектральную функцию импульса электрического напряжения, которое возбуждает ПЭП; $F_{\text{ИЗЛ}}(\omega)$ – выражение, описывающее частотную характеристику ПЭП. В качестве волнового аргумента стоит выбрать x_k , как и в (1) и (2). Пусть возбуждающий электрический импульс задается в виде одного полупериода синусоиды на частоте антирезонанса пластины:

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

где T_0 – период синусоиды. Введем безразмерную частоту $\gamma = \omega/\omega_0$ (ω_0 – собственная частота пластины, под которой понимается частота ее антире-

зонанса) и безразмерное время $T = t/(T_0/2)$ (T_0 – период колебаний на антирезонансной частоте пластины). Введение безразмерного времени позволяет выражать длительность импульсов колебательной скорости не в абсолютных единицах времени, а в виде числа полупериодов колебаний на частоте антирезонанса пластины. В новых переменных выражение, определяющее с точностью до множителя форму излучаемых импульсов колебательной скорости (форму зондирующего сигнала), примет вид

$$v_{\text{ВЫХ}}(T) \sim \int_{-\infty}^{\infty} U_{\text{ИЗЛ}}(x_k) F_{\text{ИЗЛ}}(x_k) \exp(jxT) dx_k. \quad (4)$$

Выражения (1), (2) и (4) явились основными при проведении расчетных исследований, результаты которых излагаются в настоящей статье.

Далее с целью иллюстрации возможностей, достигаемых применением описанного математического алгоритма получения формы зондирующего сигнала, представлены некоторые результаты расчетов. Волновые толщины слоев, входящих в состав рассматриваемой расчетной модели, задаются в долях от волновой толщины пьезокерамики. Это сделано для удобства расчета, а также с целью представления результатов в наиболее общем виде, т. е. без «привязки» к определенным частотам. Тем не менее представляет определенный интерес сопоставление волновых толщин и геометрических размеров слоев хотя бы для какой-либо отдельно взятой частоты. Выберем в качестве таковой частоту 1 МГц. Данный выбор оправдан тем, что преобразователи рассматриваемого типа обычно имеют рабочие частоты, равные единицам мегагерц. Из (3) несложно получить

$$\alpha_i = \frac{l_i}{l_k} \frac{c_k}{c_i}, \quad (5)$$

где l_i , l_k – геометрические размеры i -го слоя и толщина керамического пьезоэлемента; c_i , c_k – скорости распространения звука в материале i -го слоя и пьезокерамике; $i = 1, 2, 3$ – номер слоя. Для оценки геометрических размеров слоев с номерами 1, 2 и 3 воспользуемся (5). В качестве пьезоактивного материала вполне может быть рассмотрена пьезокерамика ЦТС-19. Пусть глицерин является материалом слоя 1 (контактный слой). Представляющие интерес параметры глицерина: $c_1 = 1.92 \cdot 10^3$ м/с и $\rho_1 = 1.26 \cdot 10^3$ кг/м³ [6]. Тогда

при значениях $c_1 = 1.92 \cdot 10^3$ м/с, $\alpha_1 = 0.005$; 0.01 ; 0.02 ; 0.05 ; 0.1 значения l_1 составят 4.8; 9.6; 19.2; 48 и 96 мкм соответственно. Поскольку толщина контактного слоя в первую очередь зависит от шероховатости поверхности исследуемого объекта, то приведенные значения l_1 должны часто встречаться в практике ультразвукового контроля.

Клеевой слой (с номером 3) имеет параметры: $c_3 = 2 \cdot 10^3$ м/с и $\rho_3 = 2.14 \cdot 10^3$ кг/м³, соответствующие клею ДМ5-65 [4]. При $\alpha_3 = 0.005$; 0.01 и 0.02 значения l_3 составят 5; 10 и 20 мкм соответственно. При осуществлении операции склейки толщина клеевого слоя невелика, в связи с чем можно считать $l_3 = 20$ мкм чрезмерной. Это объясняется обязательной притиркой склеиваемых поверхностей (с целью удаления воздушных пузырьков и избытка клея) и помещением склеиваемых образцов под механическую нагрузку до полной полимеризации клеевого материала. Таким образом, толщина клеевого слоя $l_3 = 10$ мкм (для частоты 1 МГц это соответствует $\alpha_3 = 0.01$) вполне отвечает реальной ситуации, с которой приходится сталкиваться при изготовлении ПЭП.

Аналогично можно оценить геометрические толщины протекторов, соответствующие различным значениям параметра α_2 . Пусть, например, в качестве протектора используется пластинка, выполненная из оптического кварца ($c_2 = 5.4 \cdot 10^3$ м/с и $\rho_2 = 2.7 \cdot 10^3$ кг/м³) [6]. В этом случае для той же частоты 1 МГц значениям параметра $\alpha_2 = 0.1$; 0.2 соответствуют толщины протектора $l_2 = 0.3$; 0.6 мм соответственно. По данным [3] толщины протекторов, которые приклеиваются к пьезоэлементу, в большинстве случаев составляют 0.1...0.5 мм. Это свидетельствует о том, что $\alpha_2 = 0.1$ соответствует реальным практическим ситуациям.

Таким образом, оценочный расчет показал, что при проведении расчетного исследования, иллюстрирующего возможности математического алгоритма, связанного с определением формы зондирующего сигнала, целесообразно выбрать $\alpha_3 = 0.01$. При этом можно считать $\alpha_2 = 0.1$. Параметр α_1 может принимать значения из диапазона $\alpha_1 = 0.005$... 0.1 . Именно эти значения параметров α_i были заложены в расчет формы импульсов, излучаемых исследуемым ПЭП.

На рис. 2, в качестве примера, представлены формы импульсов колебательной скорости, излучаемых рассматриваемым пластинчатым многослойным преобразователем. Акустической нагрузкой является сталь. Расчет выполнен для случая, при котором глицерин выступает в качестве слоя контактной жидкости (слой 1). При этом на рис. 2 значения параметра α_1 приняты следующими: $a - \alpha_1 = 0.005$; $b - \alpha_1 = 0.05$; $в - \alpha_1 = 0.1$. Для всех вариантов расчета, которые показаны на рис. 2, a – $в$, значения параметра $\alpha_2 = 0.1$. Значение z_2 выбрано равным $14 \cdot 10^6$ Па · с/м, т. е. близким к значению удельного акустического импеданса кварца. Клеящая масса ДМ5-65 является материалом слоя 3 ($z_3 = 4.28 \cdot 10^6$ Па · с/м), причем $\alpha_3 = 0.01$. Расчеты выполнены в предположении, что удельный акустический импеданс демпфера преобразователя составляет $z_d = 9 \cdot 10^6$ Па · с/м. Данное значение вывбрано из тех соображений, что, с одной стороны, такое z_d является достаточно высокой степенью демпфирования пластины, а с другой – изготовление этого демпфера относительно легко достижимо и не требует применения специальных материалов и технологий. На рис. 2, a , b по осям абсцисс отложено безразмерное время T , по осям ординат отложены значения безразмерного параметра ν , выражаемого в условных (относительных) единицах, пропорциональных колебательной скорости на выходе пьезопреобразователя $\nu_{\text{вых}}(T)$. Такой подход вызван тем, что задача определения формы излучаемого импульса решается с точностью до постоянного множителя. Из представленных на рис. 2 материалов можно видеть, что длительность и амплитуда излучаемых сигналов изменяются с изменением параметра α_1 . Так, при $\alpha_1 = 0.005$ (рис. 2, a) длительность импульса (она определяется в соответствии с критерием $(-20$ дБ), т. е. за длительность сигнала принимается относительное время T , прошедшее от начала импульса до момента, когда амплитуда импульса уменьшается в 10 раз от максимального значения) равняется $\tau_{\text{и}} = 4.8$. Максимальная амплитуда в импульсе составляет $\nu = 0.93$. При увеличении α_1 на порядок, т. е. до значения $\alpha_1 = 0.05$ (рис. 2, b) длительность импульса возрастает до $\tau_{\text{и}} = 7.2$. Амплитуда сигнала при этом снижается примерно до $\nu = 0.61$. Эта тенденция изменения параметров акустического импульса сохраняется и при дальнейшем росте параметра

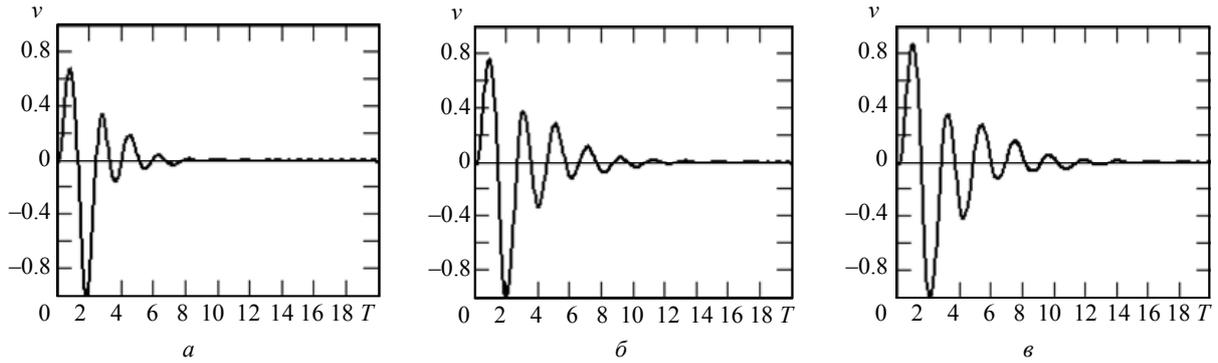


Рис. 2

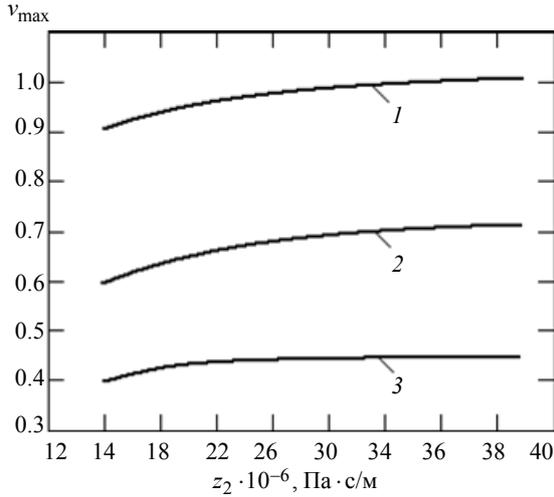


Рис. 3

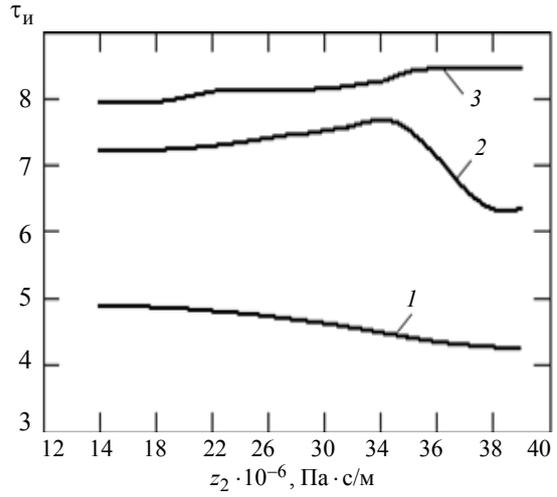


Рис. 4

α_1 . Действительно, при $\alpha_1 = 0.1$ (рис. 2, в) $\tau_n = 7.9$ и $v = 0.41$.

На рис. 3 и 4 показаны максимальные значения амплитуд акустических импульсов v_{\max} (в условных единицах) и длительности излучаемых импульсов τ_n , соответственно, в зависимости от удельного акустического импеданса протектора z_2 . Диапазон изменения z_2 на обоих рисунках одинаков и ограничен значениями $z_2 = 14 \cdot 10^6$ Па · с/м (близким к этому значению z_2 обладает кварц) и $z_2 = 45 \cdot 10^6$ Па · с/м (значение z_2 , близкое к этому, имеет сталь). По-прежнему $z_d = 9 \cdot 10^6$ Па · с/м. Данные, представленные на рис. 3 и 4, позволяют априорно судить об амплитудах и длительностях импульсов, излучаемых преобразователем пластинчатого типа с системой переходных слоев (при нагрузке ПЭП на сталь) в широком диапазоне изменения параметра z_2 . Так, например, из рис. 3 можно видеть основные тенденции изменения зависимости максимальных амплитуд сигналов на выходе преобразователя $v_{\max}(z_2)$ в диапазоне изменения α_1 от 0.005 до 0.1. Так, при малых α_1 (кривая 1, соответствующая $\alpha_1 =$

$= 0.005$), в рассмотренном диапазоне изменения наблюдается монотонное возрастание v_{\max} от 0.93 при $z_2 = 14 \cdot 10^6$ Па · с/м до ≈ 1 при $z_2 = 45 \cdot 10^6$ Па · с/м. Увеличение α_1 до 0.05 (в 10 раз) влечет за собой снижение общего уровня излучаемого сигнала во всем рассмотренном диапазоне изменения z_2 . Действительно, $v_{\max} = 0.61$ для $z_2 = 14 \cdot 10^6$ Па · с/м и $v_{\max} = 0.72$ для $z_2 = 45 \cdot 10^6$ Па · с/м (кривая 2) при сохранении монотонного характера возрастания зависимости $v_{\max}(z_2)$. Указанные тенденции изменения исследуемой зависимости $v_{\max}(z_2)$ сохраняются и при $\alpha_1 = 0.1$ (кривая 3), т. е. по-прежнему наблюдается монотонное возрастание $v_{\max}(z_2)$, правда, выраженное уже слабее. В частности, изменения амплитуды сигнала наблюдаются от 0.41 до 0.44 при изменении z_2 от $14 \cdot 10^6$ до $45 \cdot 10^6$ Па · с/м (кривая 3).

Характер кривых, отражающих изменение длительности излучаемого сигнала в зависимости от z_2 (рис. 4), довольно сильно различается при изменении параметра α_1 . На рис. 4 сохранена та

же нумерация кривых, что и на рис. 3. Можно видеть, что при $\alpha_1 = 0.005$ (кривая 1) зависимость $\tau_{и}(z_2)$ имеет монотонное спадание во всем рассматриваемом диапазоне изменения z_2 . Наблюдается снижение длительностей излучаемых импульсов от $\tau_{и} = 4.8$ при $z_2 = 14 \cdot 10^6$ Па · с/м до $\tau_{и} = 4.2$ при $z_2 = 45 \cdot 10^6$ Па · с/м. При возрастании α_1 до 0.05 (кривая 2) характер поведения исследуемой зависимости $\tau_{и}(z_2)$ изменяется. Возрастание z_2 от $14 \cdot 10^6$ до $\approx(34 \dots 35)10^6$ Па · с/м влечет за собой незначительный рост длительности сигнала $\tau_{и}$ от 7.2 до 7.5. После этого наблюдается спад $\tau_{и}$ примерно до 6.6 при $z_2 = 40 \cdot 10^6$ Па · с/м, после чего $\tau_{и}$ сохраняет свое значение около 6/6. При $\alpha_1 = 0.1$ характер изменения зависимости $\tau_{и}(z_2)$ (кривая 3) близок к монотонному возрастанию в границах рассматриваемого диапазона z_2 . Можно утверждать, что при $z_2 = 14 \cdot 10^6$ Па · с/м $\tau_{и} = 7.9$, а при $z_2 = 45 \cdot 10^6$ Па · с/м $\tau_{и} = 8.4$.

Таким образом, в статье описано применение методики определения формы сигнала, излучаемого многослойным пластинчатым пьезопреобразователем при его нагрузке на твердую среду (сталь). Изложен математический алгоритм, позволяющий заинтересованному читателю осуществить решение подобной задачи для случаев применения разнообразных конструктивных материалов и различных акустических нагрузок. Предложенная методика расчета излучаемого акустического импульса проиллюстрирована расчетными данными для случаев различных удельных акустических импедансов протектора и в достаточно широком диапазоне волновых толщин слоев. Показана возможность применения данной модели для расчета формы сигнала на выходе излучателя с учетом конкретных конструктивных особенностей ПЭП.

Работа выполнена в рамках государственной программы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» базовой части государственного задания Минобрнауки России (код проекта: 8.6743.2017/8.9), а также поддержана грантом Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (НШ-4165.2018.8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / под общ. ред. И. Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
2. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.
3. Кретов Е. Ф. Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении: учеб. пособие. СПб.: Радиоавионика, 1995. 328 с.
4. Подводные электроакустические преобразователи (Расчет и проектирование): справ. / В. В. Бого-

родский, Л. А. Зубарев, Е. А. Корепин, В. И. Якушев. Л.: Судостроение, 1983. 248 с.

5. Коновалов С. И., Кузьменко А. Г. Физические основы работы и проектирования импульсных пьезопреобразователей в задачах измерения и контроля. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.

6. Блинова Л. П., Колесников А. Е., Ланганс Л. Б. Акустические измерения. М.: Изд-во стандартов, 1971. 272 с.

R. S. Konovalov, S. I. Konovalov, A. G. Kuz'menko
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

ABOUT DETERMINING DURATION AND AMPLITUDE OF A PROBING PULSE AT THE OUTPUT OF THE PIEZOELECTRIC TRANSDUCER, IN ACCORDANCE WITH ITS CONSTRUCTIVE FEATURES

Considers a plate-shaped piezoelectric transducer, loaded through the system of transition layers to a solid medium. The presence of transitional layers is due to the need to create an acoustic contact between the object of control and the transducer (layer 1), the use of a protector (layer 2), and the presence of an adhesive bond between the radiating plate surface and the protector (layer 3). The back side of the plate is in contact with the damper. Based on the technique proposed in the previous work of the authors, an algorithm for calculating the frequency response of the transducer is described. The pulsed mode of operation of the radiator is investigated. It was assumed that the active element is excited by a voltage pulse in the form of one half-cycle of the sinusoid at the anti-resonance frequency of the plate. Estimated calculations of the thickness of the layers for a specific working frequency of the transducer are carried out. Based on this, calculations are made for a set of wave thicknesses of layers actually encountered in the practice of ultrasonic testing. Calculations are carried out in a wide range of values of the specific acoustic impedance of the protector.

Piezoelectric plate, system of transition layers, protector, frequency response, pulse mode