



МЕТОДЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КОРОТКИХ АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ В ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ С СОГЛАСУЮЩИМИ СЛОЯМИ

С. А. НАЙДА, А. В. КОРЖИК, доктора техн. наук, Т. Н. ЖЕЛЯСКОВА
(НТУУ «Киевский политехнический ин-т»)

Рассмотрены методы расширения полосы пластинчатых преобразователей путем возбуждения ступенчатыми и трапецеидальными импульсами. Методом комбинации переходных характеристик показана возможность излучения и рассчитаны амплитуда и форма короткого (полупериодного) ультразвукового импульса путем возбуждения резонансного недемпфированного преобразователя с двумя акустическими слоями электрическим импульсом ступенчатой формы, а методом интеграла Дюамеля – одноперіодного импульса путем возбуждения трапецеидальным импульсом.

The methods of expansion of stripe of transducers are considered by excitation by step and razor impulses. The method of combination of transitional descriptions is show possibility of radiation and amplitude and form of short (half of period) ultrasonic impulse are expected by excitation of resonance undamped transformer with two acoustic layers the electric impulse of step form, and method of the Duhamel integral – impulse by duration one period by excitation by a razor impulse.

Возбуждение одиночных акустических импульсов в воду механически недемпфированным пьезоизлучателем с помощью ступенчатых и трапецеидальных электрических импульсов длительностью, близкой к половине или целому периоду колебаний на резонансной частоте преобразователя, экспериментально продемонстрировано в работе [1]. Расчет условий возбуждения не проводился. Основное требование, предъявляемое к преобразователям, заключается в том, чтобы на их амплитудно-частотных характеристиках (АЧХ) был только один ярко выраженный максимум. Отмечается, что в первом приближении пьезопреобразователь может рассматриваться как система, описываемая дифференциальным уравнением 2-го порядка. Тогда переходная или импульсная характеристика должна иметь вид затухающих синусоид. Пример такой импульсной характеристики рассчитывается для напряжения конденсатора последовательного контура в работе [2].

Однако при качественном рассмотрении возбуждения пьезопреобразователя ступенчатым импульсом [1] на переходной характеристике и на осциллограмме УЗ импульса, возбуждаемого трапецеидальным, амплитуда первого полупериода меньше, чем второго (на это в работе [2] не обращается внимание).

Целью данной работы является исследование методов излучения одиночных импульсов недемпфированным пьезопреобразователем при наличии согласующих четвертьволновых слоев, что делает резонансной также и акустическую нагрузку. Такой пьезопреобразователь представляет ин-

терес для использования в медицинском широкополосном ультразвуковом сканере [3–6].

Расчет формы и амплитуды импульсов по методу переходной характеристики. Преобразователи УЗ медицинских эхоскопов состоят из кольцевых или линейных матриц пьезоэлементов, что позволяет осуществлять электронную динамическую фокусировку УЗ пучка, а также его секторное или линейное сканирование. Элементы в рабочей группе поочередно излучают ультразвук и принимают эхо-сигналы, т. е. совмещают функции излучателя и приемника звука.

В одночастотных (узкополосных) датчиках необходимая при приеме полоса частот получается либо за счет тыльного демпфирования, либо за счет двухслойной акустической согласующей (частично) системы. В последнем случае значительно увеличивается также чувствительность в режиме излучения, что особенно важно при излучении широкополосного акустического импульса.

Существенное различие случаев с тыльным демпфированием и без него заключается в том, что величина акустической нагрузки в первом случае чисто вещественная и не зависит от частоты, а во втором она комплексная (кроме отдельных частот) и частотно зависящая.

В случае четвертьволнового переходного слоя с большим волновым сопротивлением на АЧХ пьезоизлучателя наблюдаются два максимума, расположенные почти симметрично относительно частоты f_0 [1]. Рост волнового сопротивления переходного слоя вызывает удаление максимумов друг от друга и увеличение их амплитуд. При волновом сопротивлении слоя



$$z_3 \leq 0,1 z_0 \text{ или } k_3 = z_3/z_0 \leq 0,1, \quad (1)$$

где z_3, z_0 — волновое сопротивление слоя пьезоэлемента соответственно.

АЧХ имеет вид одnogорбой кривой и по своей форме становится близкой к АЧХ преобразователя без переходных слоев. Поскольку в [1] условие (1) приводится без доказательства, рассмотрим его в данной работе. Эквивалентная схема пьезопреобразователя с одним слоем приведена на рис. 1.

Реактивные элементы эквивалентного контура слоя $L_{сл}$ и $C_{сл}$ аналогичны массе и гибкости слоя. Если резонансная частота последовательного контура $L_{др}, C_{д}$ и параллельного контура $L_{сл}, C_{сл}$ одинаковые, то на этой частоте импеданс первого равен нулю, а второго — бесконечности.

На частотах $f < f_2$ импедансы имеют соответственно емкостной и индуктивный характер. На частотах $f > f_2$ наоборот. Это создает возможность их взаимной компенсации. Как показано в работе [7], условием этого является:

$$k_3 \leq 3\sqrt{2k_2^2}. \quad (2)$$

При типичном значении для воды $k_2 = z_2/z_0 = 0,05$:

$$k_3 \leq 0,17, \quad (3)$$

где z_2 — волновое сопротивление биологической ткани.

Условие (2), в отличие от (1), зависит от k_2 , как и следует ожидать из физических соображений.

Акустическая добротность на частоте f_0 при таком значении k_3 равна:

$$Q_a = \frac{\pi}{2} \left(\frac{k_3^2}{k_2} \right) = 2,7, \quad (4)$$

а при значении $k_3 = 0,12 \leq 0,17$, при котором АЧХ будет заведомо одnogорбой:

$k_3^2/k_2 = 0,28, Q_a = 5,5, \Delta f/f_0 = 1/Q_a = 0,18$, что необходимо для пьезоприемника.

В случае двух слоев с волновыми сопротивлениями z_3, z_4 такими, что: $z_0 > z_3 > z_4 > z_2$:

$$\Delta f/f_0 = 1/Q_a = \frac{2}{\pi} \left(\frac{k_3}{k_4} \right)^2 k_2, \quad (5)$$

где $k_4 = z_4/z_0$.

Приравняв это выражение величине 0,18, получим $k_3/k_4 = 2,38$. В отличие от случая с одним слоем здесь появляется возможность, сохраняя это значение отношения, и изменяя одно из значений k_3 или k_4 , находить второе.

Определим добротность преобразователя со слоями, необходимую для того, чтобы полоса пропускания в режиме приема была равна типичному для узкополосных датчиков с частотой механического резонанса $f_0 = 3,5$ МГц значению полосы импульса с длительностью $\tau_{и} = 2$ мкс, т. е. $\Delta f = 1/\tau_{и} = 0,5$ МГц. Следовательно, $Q = f_0 \Delta f = f_0 \tau_{и} = 7$. Заметим, что соответствующая такой длительности импульса продольная разрешающая способность $\Delta Z = 0,5c\tau_{и} = 1,5$ мм, где $c = 1,5 \cdot 10^3$ м/с — скорость звука в биологической ткани.

Рассчитаем параметры преобразователя и слоев с таким значением акустической добротности, его комплексную передаточную функцию, а затем для импульсов возбуждения ступенчатой и трапецеидальной формы форму акустических импульсов. Расчетная схема преобразователя с генератором гармонических колебаний или импульсов представлена на рис. 2.

Здесь $z_0 > z_3 > z_4 > z_2$ — удельные акустические импедансы пьезопреобразователя, первого и второго акустических слоев и акустической нагрузки — биологической ткани с $z_2 = 1,5 \cdot 10^6$ Па/(с·м). Введем обозначения: k_l — коэффициент электромеханической связи для колебаний по толщине; $n_3 = l_3/\lambda_3, n_4 = l_4/\lambda_4$ — волновые толщины слоев на частоте механического резонанса пьезоэлемента f_0 ; λ_3, λ_4 — длины волн в слоях на этой частоте.

Положим $k_2 = 0,05, n_3 = n_4 = 0,25$. Выражение для акустической добротности на частоте f_0 имеет вид (4).

Приравняв его 7, получим $k_3/k_4 = 2,1$. Такая добротность может быть получена для целого ряда значений k_3 и k_4 , удовлетворяющих этому отношению. Абсолютные значения выберем, исходя из следующих соображений. При полном согласовании акустических импедансов двух безграничных сред с помощью четвертьволновых слоев

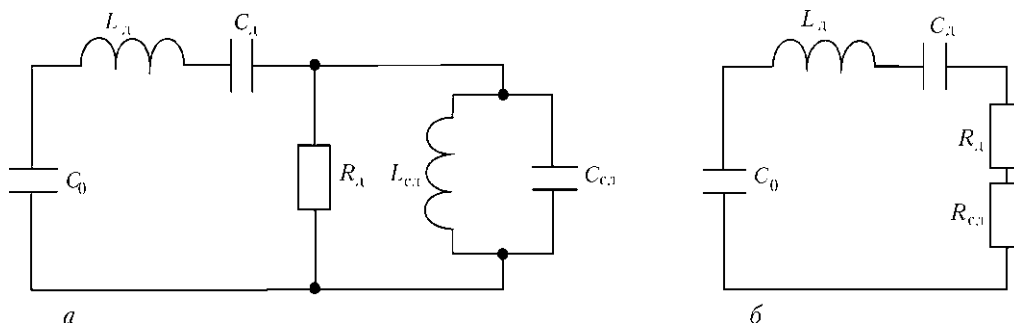


Рис. 1. Эквивалентная схема пьезопреобразователя с одним слоем: а — вблизи антирезонансной частоты пьезопреобразователя; б — на антирезонансной частоте f_0

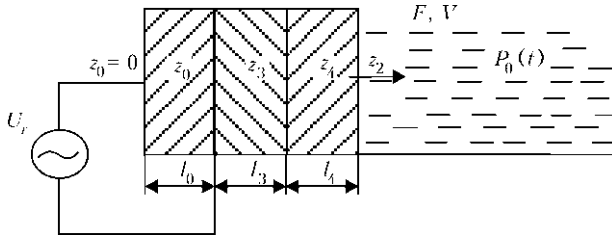


Рис. 2. Расчетная схема преобразователя с генератором гармонических колебаний или импульсов

импедансы сред и слоев должны удовлетворять условию биномиального трансформатора. При согласовании полуволнового пьезоэлемента со средой половина его толщины может рассматриваться в качестве дополнительного слоя с импедансом z_0 . Для такой трехслойной системы и $k_2 = 0,05$, $k_3 = 0,273$, $k_4 = k_3^2 = 0,074$ ($k_3/k_4 = 3,7 > 2,1$), т. е. наблюдается неполное согласование. Выберем значение $k_4 = 0,074$, тогда $k_3 = 2,1k_4 = 0,156$.

Для расчета комплексной передаточной функции преобразователя воспользуемся матричным уравнением его как электромеханического четырехполюсника [1]:

$$\begin{pmatrix} U_r \\ I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z_{1r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1/Z_{2r} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F \\ V \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где Z_{1r}, Z_{2r} — электрические сопротивления, включенные последовательно с U_r и параллельно преобразователю соответственно; $\|A_{ik}\|, \|S_{ik}\|$ — А-матрицы самого пьезоэлемента и системы слоев соответственно; F, V, I — соответственно сила, колебательная скорость и ток.

Обозначив произведение матриц $\|A_{ik}^*\|$ и $x = f/f_0$, из (6) получим:

$$K_n(x) = P/U_r = \frac{1}{A_0 A_{11}^* + A_{12}^*/z_2} = K_{n0} \Phi_n(x) e^{i\varphi_n(x)}, \quad (7)$$

где A_0 — площадь преобразователя; $K_{n0} = 2e_{33}/l_0$; e_{33} — пьезоэлектрическая постоянная; l_0 — толщина пьезопластины.

Значения коэффициентов матрицы приведены в работе [1].

Временная зависимость акустического сигнала, возбуждаемого напряжением генератора с заданным комплексным спектром $S_3(\omega)$, находится с помощью обратного преобразования Фурье.

Вещественная часть временной зависимости акустического давления будет:

$$p_a(t) = \operatorname{Re} \left[2 \int_{-\infty}^{\infty} S(f) K_n(f) e^{i2\pi ft} df \right]. \quad (8)$$

Если задается не спектр напряжения возбуждения, а временная зависимость $U_3(t)$, то:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U_3(t) e^{i2\pi ft} dt. \quad (9)$$

Из теории неперiodических детерминированных процессов для рассматриваемого случая наибольший интерес представляет функция включения:

$$U_3(t)_{\text{вкл}} = \sigma(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } t > 0 \\ 0, & \text{при } t < 0 \end{cases}, \quad (10)$$

в точке $t = 0$ эта функция неопределена. дельта-функция Дирака $\delta(t)$:

$$U_3(t)_d = \delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \neq 0, \\ \infty & \text{при } t = 0, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(t) dt = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Спектры этих функций в соответствии с (9) равны:

$$S_{\text{вкл}}(f) = \frac{1}{2\pi f} e^{-i\frac{\pi}{4}}, \quad (12)$$

$$S_d(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-i2\pi ft} dt = e^{-i2\pi f_0} = 1. \quad (13)$$

При подстановке (12) и (13) в (8) получим переходную (ПХ):

$$\begin{aligned} p_0(t) &= \frac{K_{n0}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Phi_n(f)}{f} \cos(2\pi ft - \varphi_n(f) - \frac{\pi}{2}) df = \\ &= \frac{K_{n0}}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\Phi_n(f)}{f} \sin(2\pi ft - \varphi_n(f)) df, \end{aligned} \quad (14)$$

и импульсную (ИХ) характеристики:

$$p_n(t) = 2K_{n0} \int_0^{\infty} \Phi_n(f) \cos(2\pi ft - \varphi_n(f)) df. \quad (15)$$

Следует отметить, что выражения (14), (15) применимы при $t \geq 0$. Комбинацией ПХ с разными знаками и временем начала можно получить требуемую форму акустического импульса.

Для произвольной $U_3(t)$ применима ИХ, играющая роль весовой функции интеграла суперпозиции или интеграла Дюамеля, представляющего собой свертку двух функций:

$$p_a = \operatorname{Re} \left[2 \int_0^t U_3(\xi) p_n(t - \xi) d\xi \right]. \quad (16)$$

Интеграл Дюамеля можно получить, подставляя (9) в (11) с заменой t на ξ и меняя порядок и пределы интегрирования:

$$\begin{aligned}
 p_a(t) &= \operatorname{Re} \left[2 \int_{-\infty}^t U_3(\xi) e^{-i2\pi f \xi} d\xi K_H(f) e^{i2\pi f t} df = \right. \\
 &= \operatorname{Re} \left[2 \int_0^t U_3(\xi) \left(\int_{-\infty}^{\infty} K_H(f) e^{i2\pi f(t-\xi)} df \right) d\xi = \right. \\
 &= \operatorname{Re} \left[2 \int_0^t U_3(\xi) P_H(t-\xi) d\xi \right].
 \end{aligned}$$

Обратим внимание, что в случае импульсов с длительностью τ_H интеграл Дюамеля (16) берется с пределом интегрирования τ при $\tau < \tau_H$, и τ_H при $\tau > \tau_H$.

Вводя безразмерную частоту $x = ff_0$ и безразмерное время $y = t/T = f_0 t$ и заменяя интегрирование суммированием, для ПХ получаем выражение:

$$p(y_m) = \frac{\Delta x}{\pi} \sum_{i=1}^{38} \frac{\Phi_H(x_i)}{x_i} \sin[2\pi x_i y_m - \varphi_H(x_i)], \quad (17)$$

где $x_i = i\Delta x$, $i = S_1 \dots S_2$, $y_m = m\Delta y$, $m = 0 \dots 30$, $\Delta y = 0,1$.

Возбуждение с помощью электрических импульсов ступенчатой и трапецеидальной формы. В качестве возбуждающих рассматривались ступенчатый и трапецеидальный импульсы (рис. 3).

Ступенчатый импульс определяется следующим образом:

$$U_{ст}(t) = \begin{cases} E = 0 & \text{при } t < 0, \\ U_n & \text{при } 0 < t < \tau, \\ 0 & \text{при } \tau < t. \end{cases} \quad (18)$$

Скачки напряжения одинакового знака в моменты времени 0 и τ формируют ПХ с разной амплитудой, сдвинутые друг относительно друга на половину периода колебаний с частотой f_0 .

Трапецеидальный импульс записывается следующим образом:

$$U_{тр}(t) = \begin{cases} U_0(1 - kt) & \text{при } 0 \leq t < \tau, \\ 0. & \end{cases} \quad (19)$$

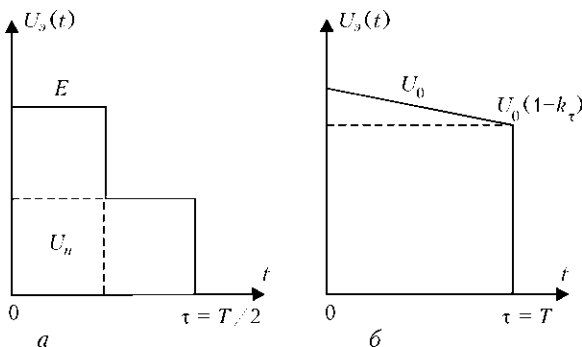


Рис. 3. Ступенчатый (а) и трапецеидальный (б) импульсы

Здесь скачки напряжения в моменты времени 0, τ имеют противоположные знаки, поэтому длительность импульса, необходимая для компенсации ПХ, должна равняться одному периоду собственных колебаний преобразователя ($\tau \cong T$ или $f_0 \tau \cong 1$).

Передаточная функция (ПФ) $\Phi_H(x_i)$ приведена на рис. 4. В интервале $x_i = 0,6 \dots 1,4$ с шагом $\Delta x = 0,02$ она рассчитывалась при двух значениях волновой толщины слоев: $n_3 = n_4 = 0,25$ и $0,28$; в интервале $x_i = 0,1 \dots 1,9$ с шагом $\Delta x = 0,05$ при $n_3 = n_4 = 0,25$.

Из рис. 4 видно, что ПФ слабо зависит от толщины слоев в интервале 12 % четверти длины волны в каждом слое на частоте механического резонанса преобразователя f_0 . Максимум ПФ находится на частоте $x = 0,86$, близкой к частоте электрического резонанса $x_1 = \sqrt{1 - 8k_t^2/\pi^2} \cong 0,89$ при $k_t^2 = 0,26$. Ширина полосы на уровне 0,707 равна $2\Delta x = 0,19$, так что $Q = \frac{x_{\max}}{2\Delta x} = 4,5$, а коэффициент затухания $\alpha/f_{\max} = \pi/Q = 0,7$; $e^{-\alpha t} = e^{\alpha T(t/T)} = e^{-0,6y}$.

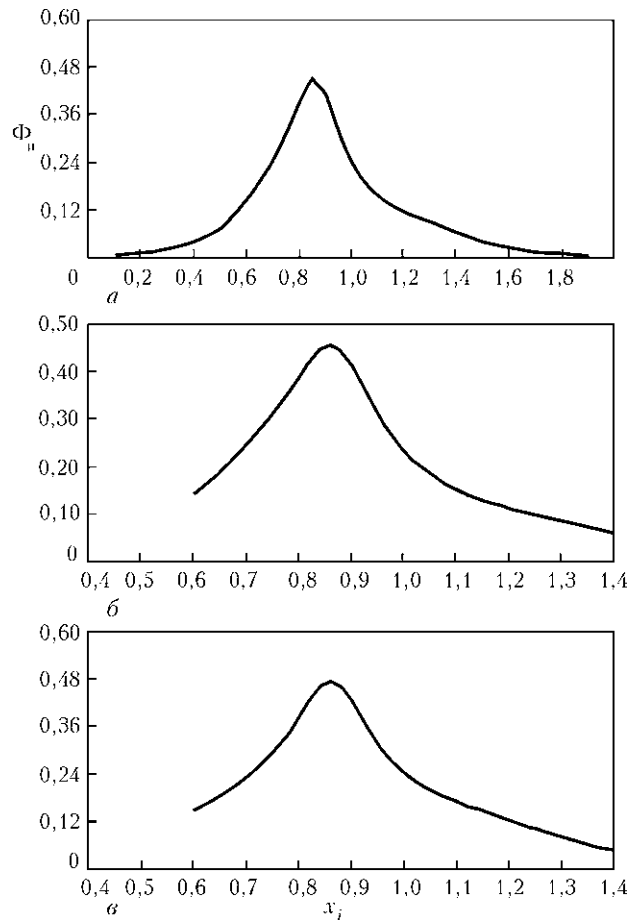


Рис. 4. Передаточная функция $\Phi_H(x_i)$: а — в интервале $x_i = 0,1 \dots 1,9$ с шагом $\Delta x = 0,05$ при $n_3 = n_4 = 0,25$; б — в интервале $x_i = 0,6 \dots 1,4$ с шагом $\Delta x = 0,02$ при $n_3 = n_4 = 0,25$; в — в интервале $x_i = 0,6 \dots 1,4$ с шагом $\Delta x = 0,02$ при $n_3 = n_4 = 0,28$



ПХ излучателя представлена на рис. 5. Она рассчитывалась для $n_3 = n_4 = 0,25$ и $x_i = 0,6 \dots 1,4$ с шагом $\Delta x = 0,02$ (а), и $x_i = 0,1 \dots 1,9$ с шагом $\Delta x = 0,05$ (б) с шагом $\Delta y = 0,1$. Положение нулей на этих кривых с точностью, равной 0,05, следующее:

- 1) 0,6; 1,2; 1,95; 2,6;
- 2) 0,55; 1,15; 1,95; 2,8.

Длительность полупериода соответственно равна:

- 1) 0,6; 0,6; 0,75; 0,65;
- 2) 0,55; 0,6; 0,8; 0,85.

Положение положительных и отрицательных амплитуд ПХ и их значений, а также значений функций

$(0,04 \exp 0,18) \exp(-0,6y) = 0,0476 \exp(-0,6y)$;
 $-(0,025 \exp 0,48) \exp(-0,6y) = -0,04 \exp(-0,6y)$,
 совпадающих с первыми положительными и отрицательными амплитудами представлены в таблице.

Видно, что затухание отрицательных амплитуд происходит по закону $\exp(-0,6y)$, а положительных отклоняется от него то в одну, то в другую стороны.

Из рис. 5 видно, что ПХ, полученные по значениям $\Phi_n(x)$ в интервале $x_i = 0,6 \dots 1,4$, не отличаются от ПХ с $\Phi_n(x)$ в интервале $x_i = 0,1 \dots 1,9$.

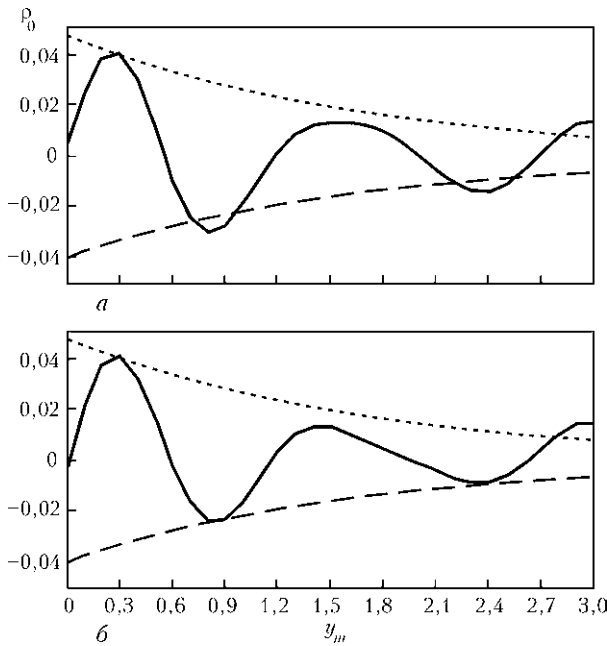


Рис. 5. Переходная характеристика излучателя $p_0(y_m)$: а — $n_3 = n_4 = 0,25$, $x_i = 0,6 \dots 1,4$, $\Delta x = 0,02$, $\Delta y = 0,1$; б — $n_3 = n_4 = 0,25$, $x_i = 0,1 \dots 1,9$, $\Delta x = 0,05$, $\Delta y = 0,1$

Значения положительных и отрицательных амплитуд ПХ

U_{\max}	0,3	-	1,45	-	2,95
p_{\max}	0,04	-	0,0125	-	0,015
$0,0476e^{-0,6y}$	0,04	-	0,02	-	0,08
U_{\min}	-	0,8	-	2,35	-
p_{\min}	-	-0,025	-	-0,01	-
$-0,04e^{-0,6y}$	-	-0,025	-	-0,00976	-

На рис. 6 представлена форма импульса, полученная комбинацией ПХ на границах ступенчатого импульса с длительностью $f_0\tau = 0,6$ при условии:

$$U_{\Pi}/(E - U_{\Pi}) = \frac{p_0(0,8)}{p_0(0,3)} \cong 0,3 \quad (20)$$

Она рассчитывалась по формуле:

$$p_a(y_m) = p(y_m), \text{ при } m = 0 \dots 12;$$

$$p_a(y_m) = p_0(y_m) + \left| \frac{p_0(0,8)}{p_0(0,3)} \right| p_0(y_n), \text{ при } m = 13 \dots 30, \quad (21)$$

где $n = m - 12 > 0$, и представляет собой однополупериодный импульс с амплитудой $0,04K_{\Pi 0}(E - U_{\Pi})$ с полной компенсацией второго полупериода и частичной последующих, амплитуда которых значительно меньше амплитуды первого. Спектр такого импульса в соответствии с (8):

$$\pi p_a(f) f_0 = \frac{\cos(0,6\pi f/p_0)}{1 - (f/f_0)^2}$$

На рис. 7 представлена форма акустического импульса, возбуждаемого трапецеидальным импульсом с длительностью $f_0\tau = 1,2$ и $k\tau = 1 - p_0(1,45)/p_0(0,3) = 0,8$, рассчитанная по формуле:

$$p_a(y_m) = p_0(y_m) - \left| \frac{p_0(1,45)}{p_0(0,3)} \right| p_0(y_n) \quad (22)$$

($n = m - 12 > 0$), не учитывающей наклонной части возбуждающего импульса, и формулам (15), (16) с заменой интегрирования суммированием:

$$p_{\Pi}(y_m) = \Delta x \sum_{i=1}^{38} [\Phi_{\Pi}(x_i) \cos(2\pi x_i y_m - \varphi_{\Pi}(x_i))],$$

где $y_m = m\Delta y$, $m = 0 \dots 30$, $\Delta y = 0,1$,

$$p_a(y_m) = \begin{cases} \Delta \xi \sum_{l=0}^m (1 - 0,67 \xi_l) p_{\Pi}(y_m - \xi_l) & \text{при } m \leq 12, \\ 12 & \\ \Delta \xi \sum_{l=0}^m (1 - 0,67 \xi_l) p_{\Pi}(y_m - \xi_l) & \text{при } m > 12. \end{cases} \quad (23)$$

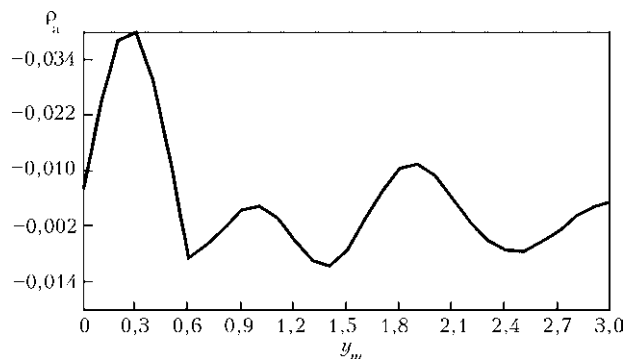


Рис. 6. Форма акустического импульса $p_a(y_m)$, полученная комбинацией ПХ на границах ступенчатого импульса

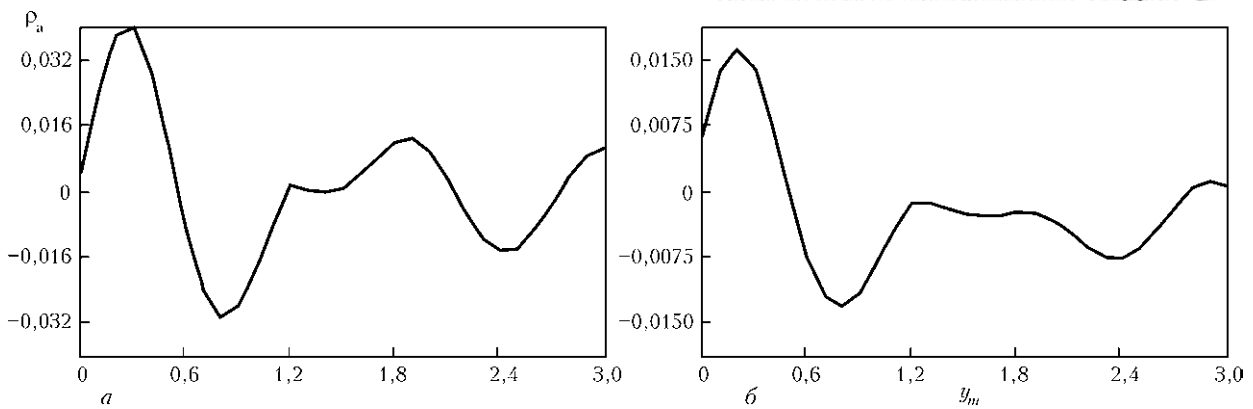


Рис. 7. Форма акустического импульса $p_a(v_m)$, возбуждаемого трапецидальным импульсом, рассчитанная по формулам: а (22) и б (23)

Такой датчик, являясь принципиально резонансной системой, позволяет формировать акустические импульсы с полосой частот от 0 до f_0 . В эхоскопах, не использующих режим Доплера, он может быть использован как универсальный. Широкодиапазонность его в режиме приема может быть обеспечена перестройкой индуктивности, компенсирующей стационарную емкость преобразователя.

Выводы

Методом комбинации переходных характеристик показана возможность излучения и рассчитаны амплитуда и форма короткого (полупериодного) УЗ импульса с полосой частот $\Delta f/f_0 \approx 2$ путем возбуждения резонансного недемпфированного преобразователя с двумя акустическими слоями электрическим импульсом ступенчатой формы, а методом интеграла Дюамеля также однопериодного импульса путем возбуждения трапецидальным импульсом.

Показана возможность фильтрации широкополосного эхо-сигнала и изменения средней частоты

фильтруемой полосы путем компенсации емкости преобразователя с согласующими слоями параллельной индуктивностью и с помощью широкополосного процессора.

1. Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. — Вильнюс: Минтис, 1975. — 258 с.
2. Баскаков С. И. Лекции по теории цепей. — М.: Изд-во МЭИ, 1991. — 224 с.
3. Найда С. А., Дидковская М. В. Широкополосный ультразвуковой терапевтический излучатель // Электроника и связь. — 1999. — № 6. — Т.2. — С. 86–91.
4. Найда С. А. Принципы построения широкополосных ультразвуковых терапевтических излучателей // Там же. — 2002. — № 14. — С. 35–38.
5. Найда С. А. Модель зв'язаних контурів у теорії нових широкополосних електроакустичних приладів для медицини, і в теорії слуху // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2004. — № 1. — С. 94–99.
6. Пат. 9958 UA, № u200504102; МПК 7 A61N1/00. Ультразвуковой терапевтический аппарат / С. А. Найда, В. С. Дидковский, О. П. Остапенко, М. К. Родионов; Заявник НТУУ «КПІ». — Заявл. 28.04.2005; Опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10.
7. Дидковский В. С., Найда С. А. П'єзоелектричні перетворювачі медичних ультразвукових сканерів: Навч. посібник. — Київ: НМЦВО, 2000. — 178 с.

Поступила в редакцию
20.12.2011

XIII Международная специализированная выставка приборов и оборудования для промышленного неразрушающего контроля «Дефектоскопия» с 4 по 6 сентября 2012 г., Санкт-Петербург, Михайловский Манеж

Выставка «Дефектоскопия» — это мероприятие, ориентированное на практическое применение современных средств неразрушающего контроля и технической диагностики в промышленности, на транспорте, в строительстве.

www.restec.ru.defectoscopy

9-я Международная специализированная выставка «Металлургия-2012» с 18 по 21 сентября 2012 г., Донецк

Специализированный выставочный центр «ЭКСПОДОНБАСС». Секция «Оборудование для проверки, испытаний и измерений»: контроль параметров жидкого металла; контроль качества; неразрушающий контроль; дефектоскопия; лабораторное оборудование.

www.expodon.dn.ua