

Экспериментально-теоретическое моделирование переходных процессов в пьезопреобразователях

Борис Ч. И¹, Р. С. Коновалов², С. И. Коновалов³, А. Г. Кузьменко³, В. М. Цаплев⁴

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹ee.boris.eut@gmail.com, ²rskonovalov.eut@gmail.com, ³sikonovalov.eut@gmail.com, ⁴valery@convergences-fr.ru

Аннотация. Исследован импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух иммерсионных пластинчатых пьезопреобразователей. Излучающий преобразователь возбуждался электрическими сигналами сложной формы, представляющими собой комбинацию возбуждающего и компенсирующего импульсов. Амплитуды компенсирующих полупериодов заранее определялись на основе математического алгоритма, развитого в предшествующих работах авторов. Показано, что применение сигналов сложной формы позволяет существенно уменьшить длительность сигнала на выходе приемника по сравнению со случаем, когда излучатель возбуждается электрическим импульсом в виде одного полупериода колебаний на частоте толщинных колебаний пьезопластины. Экспериментальные результаты хорошо совпадают с расчетными, полученными методом конечных элементов в программе COMSOL.

Ключевые слова: система излучения-приема; пьезоэлектрический преобразователь; метод конечных элементов; переходные процессы

I. ВВЕДЕНИЕ

Постоянное повышение требований качества к производимой промышленностью продукции приводит к необходимости совершенствования характеристик разнообразных систем неразрушающего контроля (НК) данной продукции. В частности, при разработке акустических систем НК подобное обстоятельство приводит к необходимости улучшения метрологических характеристик чувствительных элементов, коими являются акустические преобразователи. В настоящее время наибольшее распространение среди них получили пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) [1]. Теоретические основы их работы рассмотрены в научно-технической литературе весьма подробно [2–5]. В данном же исследовании авторами теоретически (методом конечных элементов) и экспериментально рассмотрен вопрос получения короткого акустического сигнала на выходе узкополосных пластинчатых ПЭП в ультразвуковых иммерсионных дефектоскопических системах излучения-приема (рис. 1). Необходимость

получения именно короткого акустического сигнала объясняется применением таких систем для решения эхолотационных задач, где важны: разрешающая способность, величина мертвой зоны, точность определения координат обнаруживаемых дефектов.

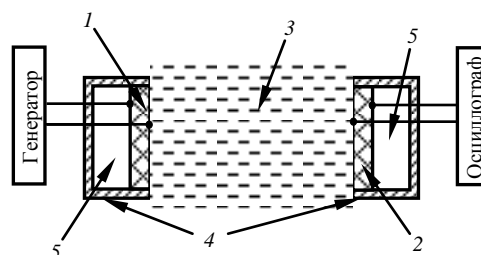


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На основе метода последовательных отражений (метода Даламбера), применение которого для данной задачи описано в предшествующих работах авторов [6–8], был определен вид возбуждающих излучатель сигналов сложной формы, необходимых для существенного уменьшения длительности сигнала на выходе приемного ПЭП. Для определения степени сокращения его длительности проводилось сравнение с сигналом на выходе приемного ПЭП, когда излучатель возбуждается электрическим импульсом в виде одного полупериода колебаний на частоте толщинных колебаний пьезопластины.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ-ПРИЕМА

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, схема которой изображена на рис. 1. Она включала в себя излучающий 1 и приемный 2 пьезопреобразователи (две идентичные пьезопластины, выполненные из пьезокерамики ЦТС-19). Возбуждение излучателя осуществлялось генератором сигналов специальной формы Tabor Electronics WW2572A. Выходной сигнал с приемника анализировался с помощью осциллографа LECROY WaveAce 101. Формируемые генератором и фиксируемые осциллографом электрические сигналы обрабатывались в цифровой форме на ЭВМ. В качестве иммерсионной жидкости использован

Исследование выполнено в рамках государственной работы «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.

глицерин 3, что исключало возможность короткого замыкания. Параметры пьезопластин: рабочая частота – 1 МГц, диаметр 20 мм, толщина – 1,25 мм. Тыльные стороны пластин, размещенных в корпусах 4, были нагружены на воздух 5 [9].

Описанная система излучения-приема обладала возможностью регулировки расстояния между рабочими гранями пьезопластин. Это расстояние при проведении экспериментальных измерений было равным 108 мм. Соосность системы достигалась путем определения положения пьезопреобразователей, при котором наблюдался максимум сигнала на выходе приемника в непрерывном режиме излучения.

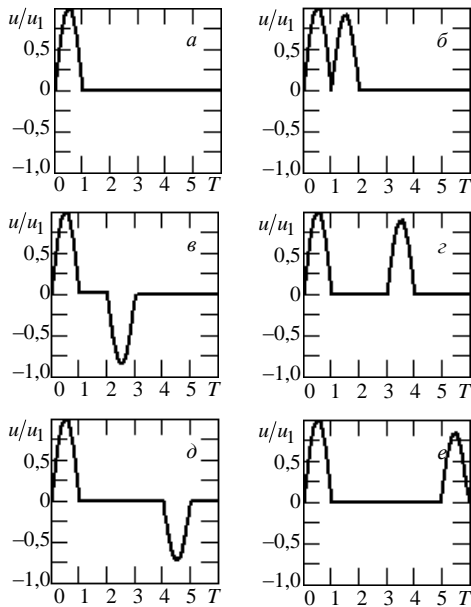


Рис. 2. Формы электрических сигналов, возбуждающих излучающую пьезопластину

На вход излучателя подавались электрические сигналы сложной формы, рассчитанные методом Даламбера на основе алгоритма, приведенного в работах [6, 7]. Формы этих сигналов приведены на рис. 2. По оси абсцисс отложено безразмерное время T , которое определяется как $T = t/(T_0/2)$, где t – физическое (истинное) время, T_0 – длительность периода колебаний на частоте антирезонанса пластины. По осям ординат отложено нормированное к амплитуде возбуждающего полупериода u_1 электрическое напряжение u/u_1 . На рис. 2, а показан подаваемый на излучатель электрический сигнал, состоящий только из одного (возбуждающего) полупериода синусоиды. На рис. 2б–е показаны электрические импульсы сложной формы, предназначенные для подачи на излучающую пластину. Они содержат возбуждающий и компенсирующий полупериоды. Амплитуды возбуждающего полупериода, вследствие принятой нормировки, всегда равны 1, а амплитуды компенсирующих полупериодов составляют: 0,926

(рис. 2 б); –0,852 (рис. 2в); 0,789 (рис. 2г); –0,726 (рис. 2д); 0,672 (рис. 2е).

Формы электрических сигналов на выходе системы излучения-приема в зависимости от сигналов, поступающих на вход излучателя, приводятся ниже в сравнении с результатами решения задачи методом конечных элементов.

III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Использование метода Даламбера, позволило получить оценочные значения амплитуд возбуждающего и компенсирующего полупериодов сигнала, подаваемого на излучатель. При этом задача решалась для одномерной модели пьезопластины в традиционном допущении о малости ее толщины по сравнению с размерами апертуры. В случае же учета ограниченности его размеров необходимо применение численных методов расчета, среди которых активно используются метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ), спектрально-элементный метод (СЭМ), метод конечных разностей (МКР) и другие. В данном исследовании применен метод конечных элементов с использованием Structural Mechanics, Acoustic и Electrostatic модулей расчетной программы COMSOL.

Теоретические основы

Электрические и механические явления, происходящие в системе излучения-приема (механическая деформация u , механическое напряжение σ , напряженность электрического поля E и электрического смещения D) могут быть описаны на основе уравнений прямого и обратного пьезоэффекта:

$$\left. \begin{aligned} u_i &= s_{ij}^E \sigma_j + d_{im} E_m \\ D_m &= d_{mi} \sigma_i + \varepsilon_{mk}^{\sigma} E_k \end{aligned} \right\}$$

где s_{ij}^E – механическая податливость материала при $E = 0$, $\varepsilon_{mk}^{\sigma}$ – диэлектрическая проницаемость при $\sigma = 0$, d_{mi} – пьезоэлектрический модуль.

Вместе с тем процесс распространения акустических волн должен подчиняться волновому уравнению:

$$\frac{1}{c} \frac{d^2 p}{dt^2} = \nabla \cdot (-\nabla p), \quad (1)$$

где p – давление в жидкости, ∇ – гамильтониан, c – скорость звука в среде.

Передача механических смещений и напряжений из излучающего пьезоэлемента в среду и из среды в приемный пьезоэлемент описывается граничным условием, заключающимся в непрерывности нормальной составляющей ускорения на границах раздела:

$$\mathbf{n}(-\nabla p) = \mathbf{n} \frac{d^2 \xi}{dt^2}$$

где \mathbf{n} – нормаль к границе раздела сред, ξ – механическое смещение.

При численном решении дифференциального уравнения (1) помимо граничных условий необходимо определить начальные условия, состоящие в равенстве нулю давления $p = 0$, $\frac{\partial p}{\partial t} = 0$ и смещения $\xi = 0$, $\frac{\partial \xi}{\partial t} = 0$ в исследуемой области в начальный момент времени.

Описание модели

Разработанная в COMSOL модель по своим геометрическим параметрам полностью повторяет условия эксперимента. Так, на рис. 3 представлена геометрическая модель, ось ординат которой совпадает с осью, соединяющей центры излучающей и приемной пьезопластин, а ось абсцисс – радиус (r) данной осесимметричной модели. Излучающая пьезопластина 1 нагружена одной стороной на глицерин и возбуждается электрическим импульсом сложной формы (рис. 2). Формируемый акустический импульс, пройдя сквозь глицерин 3, попадает на приемную пьезопластину 2. Пьезопластины жёстко закреплены по краям. Частота электрических импульсов возбуждения равна 1 МГц, толщина пьезопластин – 1,25 мм, диаметр – 20 мм. Пьезоэлементы расположены соосно на расстоянии 108 мм друг от друга. Материал пьезоэлементов – пьезокерамика ЦТС-19 [10].

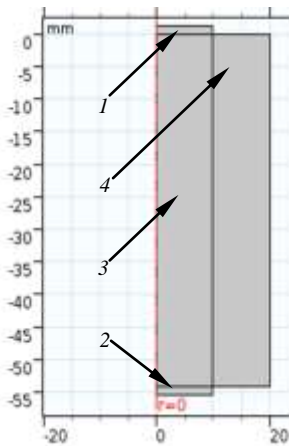


Рис. 3. Формы электрических сигналов, возбуждающих излучающую пьезопластину

Метод конечных элементов применим только для моделей конечных геометрических размеров. Вследствие расхождения ультразвукового пучка, возможны переотражения от границ глицеринового слоя 3. С целью исключения переотражений, в расчетной модели используется идеально согласованный слой 4, который без отражения пропускает волны, падающие в него из других зон и не отражает их обратно [11].

Разбиение исследуемой области на подобласти dx , осуществлялось на основе следующего критерия $dx = \lambda/16$, где λ – длина волны в глицерине. Временной шаг dt выбирался, исходя из критерия Куранта–Фридрихса–Леви

(CFL), являющегося необходимым условием стабильности численного решения дифференциального уравнения [12]. Для двумерного случая данный критерий выглядит следующим образом:

$$c_x \frac{dt}{dx} + c_y \frac{dt}{dy} < CFL, \quad (2)$$

где c_x, c_y – скорости звука в глицерине относительно координатных осей x и y соответственно; dx, dy – шаги по координатным осям x и y . Поскольку глицерин – материал линейно изотропный, то $dx = dy$, $c_x = c_y = c$, $CFL = 1$. Тогда уравнение (2) можно переписать в следующем виде $2c \frac{dt}{dx} \leq 1$ или $dt \leq \frac{dx}{2c}$.

В результате, учитывая, что $dx = \lambda/16$, а $c = \lambda f$, где f – частота возбуждения излучателя, критерий выбора временного шага примет вид $dt \leq 1/(32f)$.

IV. СРАВНЕНИЕ НАТУРНЫХ ДАННЫХ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе [9] проведено сравнение форм расчетных электрических сигналов на выходе приемника, полученных применением метода Даламбера, с экспериментальными данными. Интерес представляет также сравнение экспериментальных данных с результатами расчета методом конечных элементов. В качестве характеристик для сравнения, как и в [9], будем использовать электрическое напряжение, снимаемое с приёмной пьезопластины. Исследования, результаты которых представлены в настоящей работе, в сочетании с данными, приведенными в [9], могут представить интерес для специалистов, занятых разработкой пьезопреобразователей предназначенных для решения задач прикладной акустики.

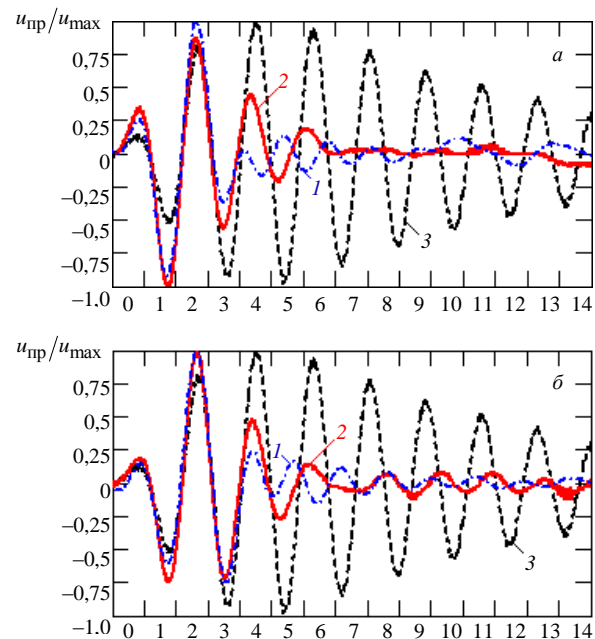


Рис. 4. Формы электрических сигналов на выходе приемника

На рис. 4, в качестве примеров, приведены формы электрических сигналов на выходе приемника для случаев подачи на излучатель электрических импульсов, изображенных на рис. 2а–в. На рис. 4 кривая 1 соответствует расчетным данным, полученным методом конечных элементов. Кривая 2 – экспериментальным данным. При этом на рис. 4а показаны результаты, относящиеся к случаю, при котором на излучатель поступает сигнал, изображенный на рис. 2б. На рис. 4б представлены результаты, соответствующие случаю, при котором на излучающую пьезопластину подается электрический импульс, показанный на рис. 2в. Кроме того, рис. 4 дополнительно содержат кривую под номером 3. Она соответствует сигналу, экспериментально определенному на выходе приемника при поступлении на излучатель импульса электрического напряжения, изображенного на рис. 2а. Все импульсы, представленные на рис. 4, нормированы к единице, т. е. проведена нормировка к амплитудам максимумов сигналов u_{\max} для каждого из принятых импульсов $u_{\text{пр}}$. Параметр $u_{\text{пр}}/u_{\max}$, полученный в результате нормировки, отложен по оси ординат. По оси абсцисс отложено безразмерное время $T = t/(T_0/2)$, где $T_0 = 1$ мкс – длительность периода сигнала на собственной частоте пластины; t – физическое (истинное) время.

Анализ материалов, представленных на рис. 4, свидетельствует о том, что кривые 1 и 2 очень близки. При этом основные части импульсов практически полностью совпадают, некоторые расхождения наблюдаются лишь в заключительной («хвостовой») части сигнала. Видно, что длительность сигнала на выходе приемника в эксперименте (кривая 2) и при численных расчетах (кривая 1) сильно сокращается в сравнении с сигналом соответствующим кривой 3. Так, например, для случая, представленного на рис. 4а, она сокращается с 27 до 11 полупериодов (по уровню –20 dB от максимума).

Стоит отметить, что «хвосты» импульсов на кривых 1 и 2 имеют частотные искажения по сравнению с основной (начальной) частью импульсов. Данный факт можно объяснить влиянием компенсирующего полупериода сигнала, поступающего на излучатель.

В работе [9], основанной на применении при расчете метода Даламбера, в качестве модели пьезоэлемента предполагалась безграничная пластина. Полученные расчетные результаты использовались как оценочные, необходимые для анализа переходных процессов в пьезоэлементе конечных размеров в COMSOL. Можно утверждать, что каждый из рассмотренных методов расчета дает качественно и количественно сходные с экспериментом результаты.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе численно и экспериментально изучен импульсный режим работы системы излучения-приема, состоящей из двух идентичных пьезокерамических пластин. В качестве иммерсионной жидкости выбран глицерин. Экспериментально подтверждено, что возбуждение излучателя сложным электрическим сигналом, форма которого определена расчетно-теоретическим путем, позволяет снизить длительность сигнала на выходе приемника. Проведено сравнение длительностей выходных сигналов с приемника для случая возбуждения излучателя сигналом в виде одного полупериода синусоиды на собственной частоте излучающей пластины и ряда конкретных видов сигналов сложной формы. Отмечено сходство форм расчетных и экспериментальных сигналов на выходе системы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность сотрудникам кафедры Электроакустики и ультразвуковой техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. СПб.: Политехника, 2014. 294 с.
- [2] Кикучи Е. Ультразвуковые преобразователи. М.: Мир, 1972. 407 с.
- [3] Ultrasonic Transducers. Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications /Ed.: K. Nakamura. Woodhead Publishing, 2012. 722 p.
- [4] Ультразвуковые преобразователи для неразрушающего контроля / Под общ. ред. И.Н. Ермолова. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
- [5] Домаркас В.И., Кажис Р.-Й.Ю. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1974. 256 с.
- [6] Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. О возможности сокращения длительности переходного процесса в акустическом преобразователе при помощи компенсирующего электрического импульса // Дефектоскопия. 2014. Т. 50, № 7. С. 12-19.
- [7] Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Получение коротких импульсов на выходе системы излучения-приема при возбуждении излучателя электрическими импульсами специальной формы // Дефектоскопия. 2016. Т. 52, № 4. С. 16-25.
- [8] Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. К вопросу о частотах резонанса и антирезонанса пластинчатого пьезокерамического преобразователя // Дефектоскопия, 2017. Т. 53, № 11. С. 50-54.
- [9] И Б.Ч., Коновалов Р.С., Коновалов С.И., Кузьменко А.Г., Ошурков И.Ю., Цаплев В.М. Уменьшение длительности импульса на выходе приемника при возбуждении излучателя сигналами сложной формы // Дефектоскопия. 2018. Т. 54, № 1. С. 33-39.
- [10] Пьезокерамические преобразователи: Справ. / Под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 256 с.
- [11] Berenger J.P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journal of Computational Physics. 1994. Vol. 114, Is. 2, pp. 185-200.
- [12] Courant R., Friedrichs K., Lewy H. Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik // Mathematische Annalen. 1928. Vol. 100, pp. 32-74.