

Reznichenko Aleksandr Anatolevich – e-mail: naos_88@mail.ru; 49, 1-st Line, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79518221278; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

Slutsky Dmitry Sergeevich – e-mail: sdiman85@mail.ru; 3-138, Azovskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185101935; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

УДК 620.179.1

А.В. Угольков

**РАСЧЕТ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ДЕФЕКТОВ
ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ**

Рассмотрен один из методов расчёта импульсной характеристики системы «пьезо-преобразователь-среда-дефект» с учётом особенностей дефектоскопии рельсов. Метод основан на расчёте параметров акустических сигналов только в заданных точках пространства, что существенно ускоряет процесс расчёта эхосигнала. Получен вид импульсной характеристики для нескольких моделей дефектов (точечный, плоский, цилиндрический). С использованием импульсных характеристик рассчитаны формы эхосигналов при воздействии прямоугольного радиоимпульса. Для верификации результатов моделирования проведены эксперименты, показавшие хорошее соответствие с результатами моделирования.

Пьезоэлектрический преобразователь; эхосигнал; дефектоскопия; импульсная характеристика.

A.V. Ugol'kov

**CALCULATION OF PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS IMPULSE
RESPONSES FOR VARIOUS DEFECTS AT ULTRASONIC FLAW
DETECTION**

The article dwells on one of the computing methods of system “piezoelectric transducer-environment-defect” with a glance features of flaw detection. The method based on the calculation acoustic signals parameters in defined space points only, that greatly speeds up the calculation process of the echosignal. The impulse response form was given for the some defect models (point, plane, cylindrical). The echosignals forms were calculated with impulse responses under the influence rectangle radio frequency pulse. For verification modeling results experiments were completed which have shown a good qualitative consistency with modeling results.

Piezoelectric transducer; the echosignal; flaw detection; impulse response.

Для обеспечения безопасности движения поездов широко применяются средства неразрушающего контроля рельсов. При этом выражена тенденция к все более широкому применению скоростных методов дефектоскопии и средств, позволяющих получить уточнённую информацию о координатах и пространственной ориентации дефекта. Для этого внедряются многоканальные датчики. При проектировании таких дефектоскопных систем необходим расчёт формы эхоимпульсов на каждом из датчиков, по различию которых и определяется необходимая информация о дефекте [1].

На расчёт эхосигнала влияет множество параметров: размеры, ориентация и взаимное положение излучателя и дефекта, частота излучения, свойства самого материала и внешней среды. Аналитическое решение этой задачи чрезвычайно

трудоемко. Чаще поставленная задача решается численным моделированием [2, 3]. Как правило, используется моделирование акустического поля среды распространения волны методом конечных разностей во временной области (КРВО – FDTD) [4]. Этот метод позволяет рассчитать акустическое поле при произвольных размерах и форме излучателя и дефекта, различных свойствах среды распространения ультразвуковых волн и многих других параметрах. С помощью метода КРВО можно вычислить акустические поля, изменяемые во времени. Однако метод КРВО требует больших вычислительных ресурсов, так как вычисляется полная картина акустического поля.

Форма эхосигнала на принимающем пьезоэлектрическом преобразователе (ПЭП) может быть также определена путём свёртки сигнала, воздействующего на излучающий ПЭП, с импульсной характеристикой системы «излучающий ПЭП-среда-дефект-среда-принимающий ПЭП». Основной проблемой является определение этой импульсной характеристики, так как она зависит от многих факторов, в частности, от взаимного расположения ПЭП-ов, дефекта и формы дефекта.

Ниже приводится методика расчёта импульсной характеристики при условии, что излучающий ПЭП является и принимающим, а ультразвуковые волны от ПЭП в контролируемую среду (сталь) проникают через призму из оргстекла (рис. 1), что чаще всего имеет место при дефектоскопии рельсов.

Так как среды распространения ультразвуковых волн (оргстекло и сталь) являются однородными, то расчёты можно существенно упростить, если рассчитывать поля только в некоторых, ключевых точках пространства – на границах поверхностей «ПЭП-среда» и «среда-дефект». Кроме того, при используемых в настоящее время уровнях акустических воздействий на призму и сталь рельса их можно считать линейными средами, что позволяет использовать принцип Гюйгенса. В этом случае основание призмы и дефект разбиваются на элементарные зоны, и полагается, что каждая зона излучает сферическую волну. На рис. 1 показано, как определяется уровень акустического возбуждения одной точки (зоны) на границе «призма-рельс», от которой волна распространяется к одной из точек (зон) дефекта.

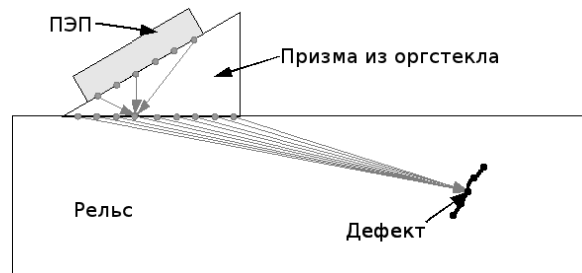


Рис. 1. К принципу расчёта эхосигнала в заданной точке

Излучаемая ПЭП волна возбуждает все элементарные зоны основания призмы, которые, в свою очередь, являются вторичными излучателями. Затем колебания от этих зон суммируются в каждой точке поверхности дефекта. Далее, поверхность дефекта будет сама излучать ультразвуковые колебания (отражённая волна), которые будут распространяться в обратном направлении – к ПЭП. Положения элементарных зон всех поверхностей заданы, следовательно, можно определить и расстояния между ними, что позволяет рассчитать затухание и задержку колебаний, проходящих между ними.

Разобьём поверхность ПЭП на N зон, основание призмы на M зон, а поверхность дефекта на K зон. Введем следующие обозначения: l_{ij} – расстояние от i -й зоны ПЭП до j -й зоны основания призмы; l_{jk} – расстояние от j -й зоны основания призмы до k -й зоны дефекта; d_{ij} и t_{ij} – коэффициент ослабления уровня колебания и его задержка на пути между i -ой зоной ПЭП и j -й зоной основания призмы; d_{jk} и t_{jk} – коэффициент ослабления уровня колебания и его задержка на пути между j -й зоной основания призмы и k -й зоной дефекта.

С учётом введенных обозначений можно записать:

$$d_{ij} = \frac{1}{A_P} \cdot e^{-\alpha_P l_{ij}} \cdot \sqrt{l_{ij}}; \quad t_{ij} = l_{ij} / v_P; \quad (1)$$

$$d_{jk} = \frac{1}{A_R} \cdot e^{-\alpha_R l_{jk}} \cdot \sqrt{l_{jk}}; \quad t_{jk} = l_{jk} / v_R, \quad (2)$$

где α_P и α_R – коэффициенты затухания колебаний в материалах соответственно призмы (35 м^{-1} , оргстекло) и рельса (1 м^{-1} , сталь); v_P и v_R – скорости распространения колебаний соответственно в призме ($2,67 \text{ мм/мкс}$, продольная волна) и рельсе ($3,23 \text{ мм/мкс}$, поперечная волна), A_P и A_R – размерные множители ($\text{м}^{1/2}$), а множители с корнем квадратным описывают уменьшение уровня колебаний во фронте цилиндрической волны от пройденного ею расстояния.

Для определения импульсной характеристики этой системы зададим воздействие на ПЭП в виде дельта-функции $\delta(t)$, которая в каждой из N зон ПЭП-а равна $\delta(t)/N$. Затухания в призме и рельсах будем полагать частотно-независимыми. Поэтому к каждой j -й зоне основания призмы придёт набор дельта-функций, отличающихся площадью и задержкой. Тогда давление в j -й зоне основания призмы определится как сумма этих дельта-функций:

$$h_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\delta(t-t_{ij})}{d_{ij}} = \frac{A_P}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{e^{-\alpha_P l_{ij}}}{\sqrt{l_{ij}}} \delta(t-t_{ij}). \quad (3)$$

Давление в k -й зоне поверхности дефекта определится как сумма колебаний, сформированных всеми элементарными зонами основания призмы, достигших k -й зоны поверхности дефекта:

$$\begin{aligned} h_k(t) &= \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \frac{h_j(t-t_{jk})}{d_{jk}} = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} \frac{1}{d_{jk}} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\delta(t-t_{ij}-t_{jk})}{d_{ij}} = \\ &= \frac{A_R A_P}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \frac{e^{-\alpha_R l_{jk}}}{\sqrt{l_{jk}}} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{e^{-\alpha_P l_{ij}}}{\sqrt{l_{ij}}} \delta(t-t_{ij}-t_{jk}). \end{aligned} \quad (4)$$

Теперь, зная форму акустического колебания в k -й зоне дефекта, можно рассматривать его как некое воздействие, дающее распространяющуюся волну от этой зоны в обратном направлении. Она достигнет основания призмы и, далее, ПЭП-а. Аналогично предыдущему можно задать возмущение в k -й зоне дефекта в виде дельта-функции и найти суммарный сигнал на ПЭП. Тогда принятый ПЭП-ом сигнал от k -й зоны дефекта при воздействии на ПЭП в виде дельта-функции можно будет найти как свертку двух сигналов: от ПЭП к k -й зоне дефекта и от нее к ПЭП. Так как в рассматриваемом случае один и тот же ПЭП работает и на излучение, и на прием, то пути обратных волн от k -й зоны дефекта к j -м зонам основания призмы, а от них – к ПЭП одни и те же, что и пути прямых волн от ПЭП к k -й зоне дефекта. Анализ показывает, что в этом случае оба сигнала (от ПЭП к k -й зо-

не дефекта и от нее к ПЭП) будут одинаковы. Поэтому принятый ПЭП-м сигнал от k -й зоны дефекта при воздействии на ПЭП в виде дельта-функции находится по формуле

$$g_k(t) = h_k(t) * h_k(t), \quad (5)$$

где символом (*) обозначена операция свёртки.

Проведя такие вычисления для всех зон дефекта, можно найти импульсную характеристику рассматриваемой системы в виде

$$h(t) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} g_k(t). \quad (6)$$

Теперь, задавая колебания пьезопластины в виде зондирующего сигнала $s_H(t)$, можно найти эхосигнал на ПЭП в виде

$$s_{\mathcal{D}}(t) = s_H(t) * h(t). \quad (7)$$

Следует учесть, что вычисляются только массивы времён задержек и затуханий от излучателя к приемнику. Поэтому при переходе от них к временному представлению сигналов необходимо задаться интервалом времени, на котором определена импульсная характеристика, затем этот интервал разбить на достаточно малые временные «кванты» и определить, какие затухания входят в каждый из «квантов» и найти сумму их площадей. Чем меньше «кванты», тем меньше ошибка округления, но соответственно затрачивается больше вычислительных ресурсов. Поэтому предварительно необходимо выбрать такие интервал времени и длительность «кванта», чтобы результаты расчёта перестали существенно изменяться. При проведении расчетов было выяснено, что в данном частном случае при длине пьезопластины 5 мм, основания призмы 20 мм и диаметре цилиндрического отверстия 2 мм, достаточно задать $N = 150$, $M = 250$, $K = 60$ и длину временного «кванта» 2 нс.

На рис. 2 показаны импульсные характеристики системы для 3-х положений ПЭП относительно цилиндрического дефекта диаметром 2 мм и расположенного на глубине 7 мм. Длина излучающего ПЭП-а – 10 мм, угол наклона призмы – 33 град.

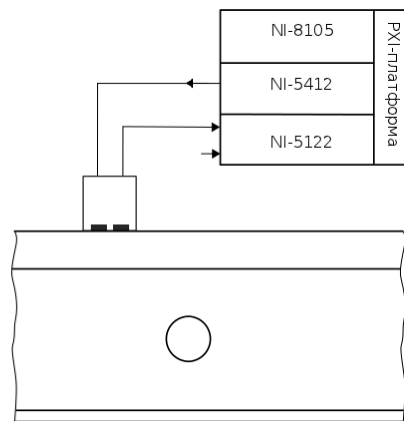


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

На рис. 3 показаны огибающие эхосигналов, рассчитанные по формуле (7) для импульсных характеристик, показанных на рис. 2. При расчетах полагалось, что воздействие – это радиосигнал с прямоугольной огибающей, длительностью 2 мкс и центральной частотой 2,5 МГц.

На компьютере с процессором Intel Core i5 M430 2,27 ГГц (4 вычислительных потока) расчёт зависимостей, показанных на рис. 5, вычислялся за 15 мин, а зависимости, показанные на рис. 6, – 3,5 мин, что свидетельствует о приемлемой вычислительной сложности алгоритма.

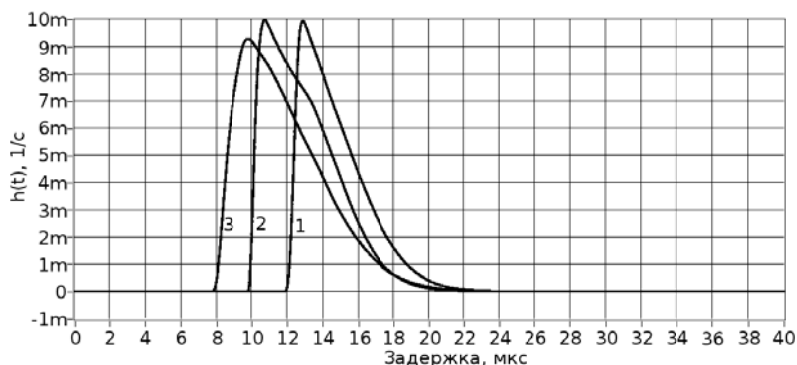


Рис. 3. Импульсные характеристики системы для разных положений ПЭП:
1 – 8 мм, 2 – -3 мм, 3 – +2 мм

Для проверки полученных результатов проводилась серия экспериментов на стандартном образце СО-3Р [5]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 4. При помощи компьютера NI-8105 и генератора сигналов NI-5412 сформирован зондирующий импульсный радиосигнал с прямоугольной огибающей, центральной частотой 2,5 МГц, длительностью 2 мкс и периодом повторения 100 мкс. Далее этот сигнал подавался на одну из пьезопластин, а с другой записывались эхосигналы.

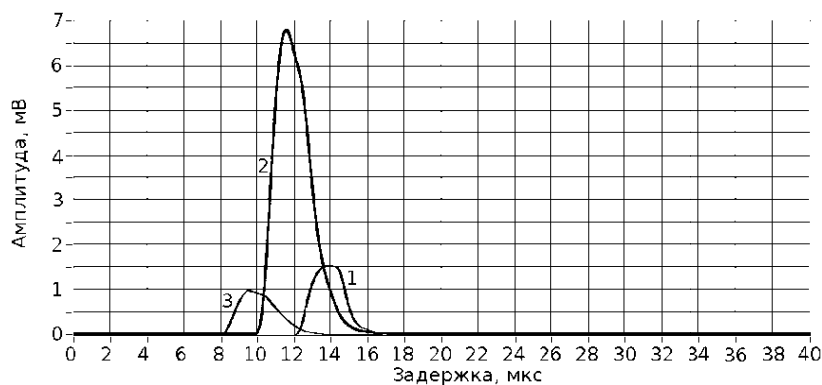


Рис. 4. Огибающие эхосигналов

На рис. 5 показана зависимость амплитуды эхосигнала от смещения ПЭП относительно отверстия расположенного на глубине 44 мм. На рис. 6 показана аналогичная зависимость, только отверстие расположено на глубине 7 мм. Сплошной линией указаны результаты эксперимента, пунктирной – результаты моделирования.

Как видно из рисунков, зависимости, полученные моделированием, по форме близки к экспериментальным. При моделировании ультразвуковых полей не учитывалось переотражение волн. В эксперименте эхосигнал принимался не только от дефекта, но и от дна рельса, стенок образца, граней призмы и других поверхностей.

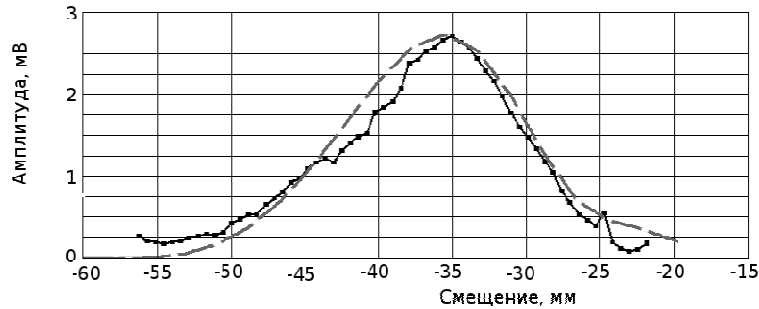


Рис. 5. Зависимость амплитуды эхосигнала от смещения ПЭП относительно отверстия диаметром 8 мм и на глубине 44 мм

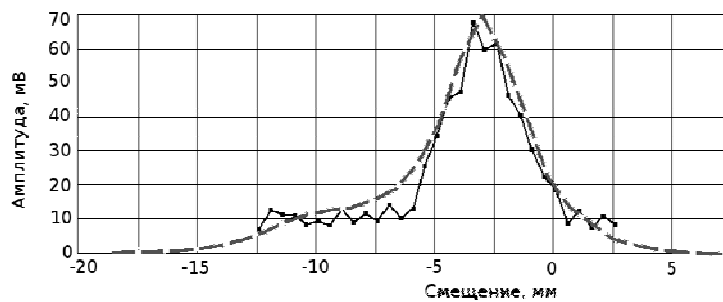


Рис. 6. Зависимость амплитуды эхосигнала от смещения ПЭП относительно отверстия диаметром 2 мм и на глубине 7 мм

Характеристики реального ПЭП также несколько отличаются от задаваемых при моделировании. В эксперименте датчик смещался вручную, без жёсткой фиксации ПЭП относительно дефекта, поэтому определить точное положение датчика относительно дефекта достаточно сложно. Однако форма и характер принятого сигнала близка к расчётной. Более точного соответствия можно добиться, если учитывать влияние других отражающих поверхностей и использовать механические средства для перемещения датчика, чтобы уменьшить погрешности измерения.

Предложенный алгоритм расчета импульсной характеристики системы «ПЭП-дефект-ПЭП» позволяет вычислить эхосигналы от дефекта за достаточно короткое время и с приемлемой точностью, по сравнению с методом КРВО. Были проведены эксперименты, которые показали хорошее соответствие с результатами моделирования.

Алгоритм выполнен в виде пакета программ, рассчитывающих интенсивность звукового поля в различных точках заданной среды при точечном, плоском или цилиндрическом дефектах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дымкин Г.Я., Цомук С.Р. Физические основы ультразвуковой дефектоскопии: Учебное пособие. – СПб.: Петербургский государственный университет путей сообщения, 1997. – 102 с.
2. Бархатов В.А. Расчет ультразвукового поля преобразователя в импульсном режиме // Дефектоскопия. – 2005. – № 7. – С. 3-12.
3. Бархатов В.А. Решение волновых уравнений методом конечных разностей во временной области. Двумерная задача. Основные соотношения // Дефектоскопия. – 2007. – № 9. – С. 54-70.

4. John B. Schneider. Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method. 395. January 2, 2011.
5. ГОСТ 18576-96: Контроль неразрушающий. Рельсы железнодорожные. Методы ультразвуковые.
6. Крауткремер Й., Крауткремер Г. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд.: Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.
7. LabVIEW для всех. Джеффри Тревис: Пер. с англ. Н.А. Клушин. – М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. – 544 с.
8. Федосов В.П., Нестеренко А.К. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW / Под ред. В.П. Федосова. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 472 с.

Статью рекомендовал к опубликованию к.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры А.И. Окорочков.

Угольков Андрей Викторович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: fylhtqug@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники.

Ugol'kov Andrei Victorovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: fylhtqug@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamentals of radio engineering.

УДК 615.471

А.В. Леонова, Ю.С. Лебедева

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СЕРТИФИКАЦИИ ХОЛТЕРОВСКОГО МОНИТОРА «ХОЛТЕР M2» В РОСЗДРАВНАДЗОРЕ

Рассматривается сертификация в Росздравнадзоре портативного медицинского прибора индивидуального пользования – холтеровского монитора (ХМ) «Холтер M2», разработанного научным коллективом ТТИ ЮФУ. Для сертификации прибора разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий методы контроля основных параметров и характеристик прибора «Холтер M2», таких как: амплитудная и частотная характеристики, энергопотребление, габаритные размеры, требования к шумам. Разработана подробная методика проверки заявленных характеристик с учетом специфики используемого оборудования, а также на основе этого комплекса был подготовлен раздел ТУ ХМ «Холтер M2» «Методы контроля».

Холтеровский монитор; сертификация; методы контроля.

A.V. Leonova, Y.S. Lebedeva

HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR CERTIFICATION HOLTER MONITOR "HOLTER M2" IN ROSZDRAVNADZOR

This article describes the certification process in Roszdravnadzor portable medical device for individual use – Holter monitor (HM), "Holter M2", developed by research teams TIT SFU. For the certification of the instrument developed hardware and software package that implements the control methods of key parameters and characteristics of the device "Holter M2", such as amplitude and frequency characteristics, energy consumption, dimensions, requirements for noise. Detailed method of checking the respective characteristics specific to the equipment used are developed, as well as on the basis of this complex the section TR HM "Holter M2" "Control Methods" are prepared.

Holter monitor; certification; control methods.