



К РАСЧЕТУ ДОННЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ ДЛЯ ПРЯМЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМОЙ АКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Г. Г. ЛУЦЕНКО, В. Г. БЕРКУТА

Исследуется зависимость амплитуды донных сигналов на выходе прямого пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) при различной длительности излучаемых импульсов и различной форме активной поверхности преобразователя.

Dependence of the amplitude of bottom signals at the output of a direct piezoelectric transducer is studied at different duration of the emitted pulses and different shape of the active surface of the transducer.

Зависимость амплитуды донного сигнала от расстояния между преобразователем и отражающей плоскостью имеет большое прикладное значение. Она используется при измерении эквивалентного размера дефекта с помощью АРД-диаграмм (при условии, что калибровка электроакустического тракта дефектоскопа проводится по донному эхо-сигналу), а также при измерении коэффициента поглощения продольных волн по методу многократных отражений. Во всех этих случаях используют стандартную зависимость, приведенную на графике совместно с АРД-диаграммами [1]. Однако известно, что эта зависимость получена для ПЭП с активной поверхностью круглой (или близкой к ней) формы и, по-видимому, при использовании импульсных сигналов некоторой определенной длительности. Если форма ПЭП, которую приходится использовать по тем или иным соображениям, и длительность используемого сигнала отклоняются от указанных выше, то и сама зависимость амплитуды донного сигнала от расстояния может измениться. Тогда использование стандартной кривой повлечет за собой погрешности измерения. Задача данной работы состоит в том, чтобы, получив зависимость амплитуды донного сигнала от расстояния расчетным путем, исследовать влияние на эту зависимость двух факторов: формы апертуры ПЭП и длительности импульсного сигнала.

Расчетный алгоритм. С привлечением преобразования Фурье расчет эхо-сигнала на выходе ПЭП сводится к последовательности расчетов для каждой из частот спектра сигнала (при соответствующей его дискретизации) с последующим применением обратного преобразования Фурье. В свою очередь, расчет на каждой из частот спектра включает в себя решение задачи излучения, отражения и приема отраженных преобразователем волн. Решение первой и третьей задач в строгой постановке труднодостижимо. Поэтому [2, 3] мы прибегнем к упрощениям, более детальное обсуждение которых можно найти в работах [4, 5]. Упрощения сводятся к тому, что воздействие ПЭП на среду аппроксимировано сторонними нормальными напряжениями, равномерно распределенными на пло-

щадке контакта, а электрический сигнал на выходе ПЭП в режиме приема считается пропорциональным интегралу по поверхности контакта от величины нормального смещения в отраженной от дна волне. Расчет поля сигнала, отраженного от дна, проводится в строгой постановке.

Применяя двумерное преобразование Фурье к распределению механических напряжений, создаваемых ПЭП на поверхности упругого слоя, представим это распределение в виде совокупности пространственных гармоник, каждой из которых соответствуют в объеме среды две волны: продольная и сдвиговая. Эти волны испытывают многократные отражения на границах слоя, претерпевая при каждом отражении взаимную трансформацию. При расчете амплитуды импульсного сигнала, получаемого в результате N -кратного отражения, предположим, что: 1) обе границы при расчете отражения можно рассматривать как свободные; 2) расстояние между границами слоя и длительность импульса таковы, что сигналы, претерпевшие трансформацию из продольной волны в сдвиговую и обратно, разделены во времени.

Таким образом, следствием трансформации волн при отражении может быть лишь частичный отбор энергии из продольной волны и некоторое ее дополнительное ослабление. При расчете отраженного поля можно также не принимать во внимание вклад неоднородных волн, имеющих в пространственном спектре излученных волн.

Нетрудно найти коэффициент преобразования однородной продольной волны, соответствующей пространственной гармонике с частотами из спектра внешнего воздействия, в продольную волну:

$$R(\kappa) = \frac{(2\kappa^2 - k_s^2)^2 + 4\kappa^2\gamma_l\gamma_s}{(2\kappa^2 - k_s^2)^2 - 4\kappa^2\gamma_l\gamma_s} \quad (1)$$

Здесь $\kappa^2 = \alpha^2 + \beta^2$; $\gamma_l^2 = \kappa^2 - k_l^2$; $\gamma_s^2 = \kappa^2 - k_s^2$; k_s , k_l — волновые числа сдвиговых и продольных волн соответственно.

Опуская промежуточные выкладки, приведем выражение для комплексной амплитуды нормального смещения частиц поверхность, где расположен преобразователь, соответствующее волне N -кратного отражения:

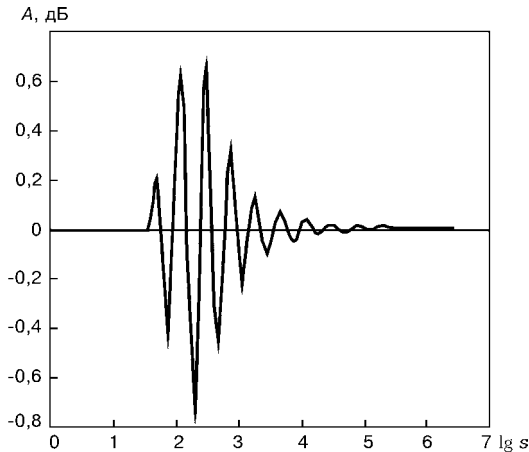


Рис. 1. Форма импульсного сигнала, принятая при расчетах

$$W(\omega, x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\alpha, \beta) F(\alpha, \beta) \frac{\gamma_l}{\rho c_s^2} R^{2N-1}(\kappa) \times \exp(-\gamma_l H) \exp(i(\alpha x + \beta y)) d\alpha d\beta, \quad (2)$$

где $S(\alpha, \beta)$ — преобразование Фурье пространственного распределения нормальных напряжений, приложенных со стороны преобразователя, на плоскости; $F(\alpha, \beta) = (k_s^2 - 2\kappa^2) / ((2\kappa^2 - k_s^2)^2 - 4\kappa^2 \gamma_l \gamma_s)$; H — толщина слоя; ρ — плотность материала слоя; c_s — скорость сдвиговых волн в слое.

После интегрирования выражения (2) по площади контакта преобразователя со средой получаем:

$$K_{ak}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S(\alpha, \beta)|^2 F(\alpha, \beta) \frac{\gamma_l}{\rho c_s^2} \times R^{2N-1}(\kappa) \exp(-\gamma_l H) d\alpha d\beta. \quad (3)$$

Это выражение можно рассматривать как акустическую частотную характеристику, определяющую изменение комплексной амплитуды спектра сигнала за счет процессов пространственной фильтрации при излучении, распространении, отражении и приеме. При известных предположениях (см. [5]), спектр эхо-сигнала на выходе преобразователя получается из спектра возбуждающего импульса, поданного на преобразователь, в результате умножения на частотные характеристики

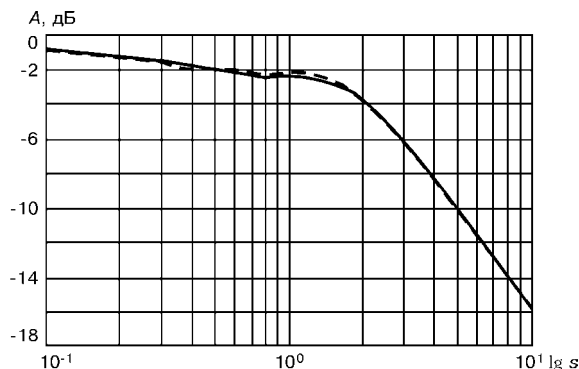


Рис. 2. Стандартная (штриховая) и расчетная (сплошная линия) зависимости амплитуды донного сигнала от нормированного расстояния

ПЭП в режиме излучения, в режиме приема и на акустическую частотную характеристику. Так как частотные свойства собственно ПЭП при излучении и приеме хорошо известны, то в нашей задаче предпочтительно задавать форму сигнала (рис. 1), уже подвергшегося фильтрации пьезопластиной при излучении и приеме (или соответствующий ей спектр $S_0(\omega)$). Тогда можно найти амплитуду эхо-сигнала на выходе ПЭП после N -кратного отражения:

$$s(t, N) = \max \left(\left| \operatorname{Re} \left(\int_0^{\infty} S_0(\omega) K_{ak}(\omega, N) \exp(-i\omega t) d\omega \right) \right| \right). \quad (4)$$

Формулы (3), (4) являются основой для вычислительного алгоритма на ЭВМ (по методу пространственных спектров). Однако при больших значениях NH подынтегральное выражение в (3) часто меняет знак, и алгоритм, заданный формулой (3), становится неудобным для вычислений. В этом случае целесообразно перейти на сверточный алгоритм, описанный ниже. Рассматривая интеграл (3) как двумерный интеграл Фурье при значениях аргументов, равных нулю, замечаем, что он является преобразованием Фурье от двух множителей:

$$Q_1(\alpha, \beta) = |S(\alpha, \beta)|^2 F(\alpha, \beta) \frac{\gamma_l}{\rho c_s^2} R^{2N-1}(\kappa) \exp(-\gamma_l H_0),$$

$$Q_2(\alpha, \beta) = \exp(-\gamma_l (NH - H_0)),$$

где $H_0 > 0$. По теореме Парсевалья:

$$K_{ak}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q_1(x, y) q_2(x, y) dx dy. \quad (5)$$

Здесь $q_1(x, y)$ — двумерное преобразование Фурье от $Q_1(\alpha, \beta)$, а $q_2(x, y)$ (как преобразование Фурье от $Q_2(\alpha, \beta)$) представляет собой распределение на горизонте $z = NH$ скалярного поля дипольного источника, расположенного в начале координат на глубине H_0 .

Зависимость амплитуды сигнала от расстояния до дна. Расчеты, основанные на формулах (3)–(5), направлены на выяснение влияния на зависимость амплитуды донного сигнала от глубины следующих факторов: 1) взаимной трансформации волн при неоднократных отражениях; 2) длительности импульса; 3) отклонения формы апертуры датчика от круга. Но прежде всего следовало убедиться, что приближенный алгоритм расчета дает результаты, достаточно близкие к известной стандартной зависимости при однократном отражении. Положительный ответ на этот вопрос дает пример расчета для ПЭП с круглой апертурой диаметром 20 мм на частоте 2,5 МГц (материал: сталь, $c_l = 6000$ м/с, $c_s = 3230$ м/с), представленный на рис. 2.

Здесь и далее амплитуда эхо-сигнала выражена в децибеллах, расстояние до дна нормировано к расчетному значению размера ближней зоны $s = H/Z$, где $Z = S/\pi\lambda$ (S — площадь апертуры преобразователя, λ — длина волны на центральной

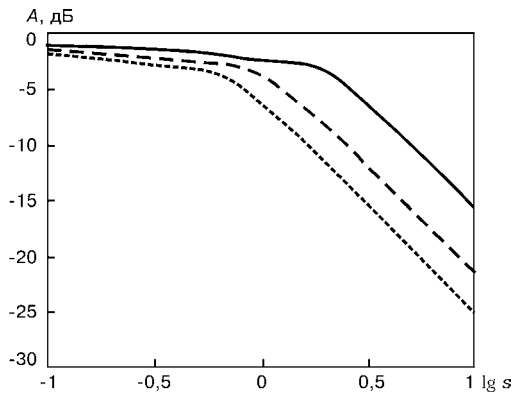


Рис. 3. Зависимости амплитуд донных сигналов для однократного (сплошная линия), двукратного (штриховая) и трехкратного (пунктирная) отражений

частоте). Как видно из рис. 2, расчетная и стандартная зависимости достаточно близки (расхождения, заметные в ближней зоне, не превышают 0,3 дБ). Это свидетельствует о том, что принятые приближения позволяют провести расчеты с достаточной для практики точностью.

Существенное влияние взаимной трансформации продольных и сдвиговых волн можно выяснить следующим образом. Если влияние незначительно, то поверхности слоя играют роль идеальных зеркал. Тогда, применяя понятие мнимого источника, следует предположить, что значение амплитуды N -кратного отражения совпадает со значением, найденным по кривой однократного отражения для расстояния, равного $z = NH$.

На рис. 3 показаны зависимости для одно-, двух- и трехкратного отражений для преобразователя диаметром 12 мм на частоте 2,5 МГц. По оси абсцисс отложен логарифм нормированного расстояния ($\lg s$). Для того, чтобы перестроить кривые N -кратного отражений в координатах, соответствующих однократному отражению, достаточно сдвинуть их вправо на $\lg N$. Как показано на рис. 4, такой сдвиг приводит к практически полному совпадению в дальней зоне. Отличия в ближней зоне не превышают 0,2...0,3 дБ (они становятся еще меньше с увеличением волнового размера апертуры). Таким образом, для реальных размеров прямых ПЭП эффектами трансформации волн при кратных отражениях ($N = 2...3$) можно пренебречь. Однако с ростом количества отражений этот эффект усиливается и в приведенном выше приме-

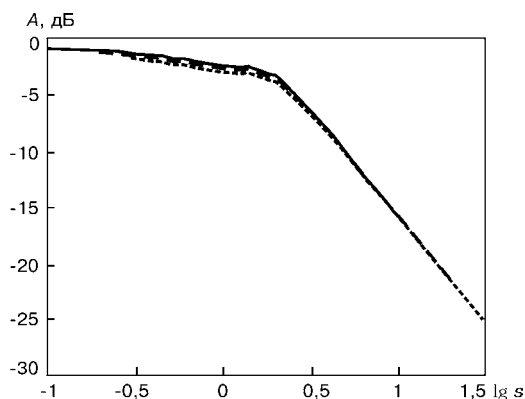


Рис. 4. Кривые донных отражений после совмещения

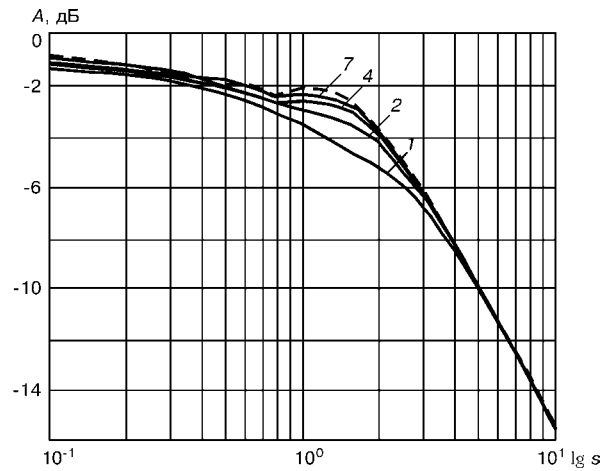


Рис. 5. Зависимости амплитуды донного сигнала от нормированного расстояния для импульсов разной длительности (длительность в периодах центральной частоты указана на кривых). Штриховой линией показана стандартная зависимость

ре отличие амплитуды 8-го отражения от значения, рассчитанного по кривой однократного отражения, достигает в пределах ближней зоны 2 дБ (при этом отличия в дальней зоне незначительны).

При исследовании влияния длительности импульса использовались импульсы с такой же огибающей, как и на рис. 1, но с разным количеством периодов центральной частоты, которые помещаются на интервале эффективной длительности импульса (на рис. 1 — четыре периода). Результаты расчетов для преобразователя с центральной частотой 2,5 МГц и диаметром 20 мм показаны на рис. 5.

Зависимости нормированы так, чтобы они совпадали в наиболее удаленной точке. Видно, что все зависимости сближаются в дальней зоне. Различия наблюдаются лишь в ближней и промежуточной зонах. При этом, если длительность больше двух периодов частоты заполнения, то отличия рассчитанных донных кривых от стандартной зависимости незначительны. Они возрастают при уменьшении длительности импульса.

Рассмотрим влияние формы апертуры ПЭП на характер зависимости амплитуды донного сигнала от расстояния. При расчетах была выбрана прямоугольная форма пластины ПЭП с различным

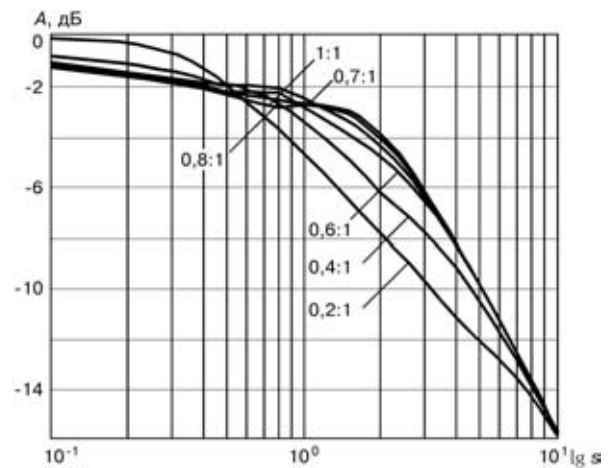


Рис. 6. Зависимости амплитуды донного сигнала от нормированного расстояния для преобразователей разной формы (соотношение сторон прямоугольника указано на кривых)



соотношением сторон при условии сохранения площади пластины. Предполагалось, что эффективная длительность импульса составляет четыре периода частоты заполнения. Результаты расчетов приведены на рис. 6.

Кривые нормированы таким образом, чтобы они совпадали в точке, соответствующей наибольшему расстоянию между ПЭП и дном. По мере увеличения диспропорции сторон прямоугольника отличия донных кривых (по сравнению со случаем квадратной пластины) увеличиваются. До тех пор, пока меньшая сторона составляет 0,7 от большей стороны, отличия от кривой для квадратной апертуры можно признать незначительными. При соотношении сторон 0,6:1 заметны отличия в промежуточной зоне.

При большей диспропорции (0,4:1, 0,2:1) заметны значительные отличия как в ближней, так и в дальней зоне. Донные кривые для преобразователей с круглой и квадратной апертурой близки, но не совпадают: наибольшее расхождение (0,6 дБ) наблюдается в ближней зоне.

НПО «Ультракон-Сервис»,
г. Киев
НТУУ «КПИ»

Выводы

Сходство стандартной донной кривой и донной кривой, рассчитанной для ПЭП с круглой апертурой, указывает на приемлемость приближений, принятых при расчетах.

Отличие донных кривых для ПЭП с круглой апертурой от стандартной кривой заметно проявляется лишь при использовании достаточно коротких импульсов (с длительностью, меньшей двух периодов частоты заполнения).

Ход донных кривых в ближней и дальней зонах существенно зависит от формы апертуры: чем больше вытянутость формы при условии равенства площадей, тем значительнее отличия.

1. *Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник* / Под ред. Ключева В. В. — М.: Машиностроение, 1995. — 488 с.
2. *Dielouah H., Baboux J. C. Transient Ultrasonic Field Radiated by a Circular Transducer in a Solid Medium* / Journ. Acoust. Soc. Am. — 1992. — 92. — P. 2932–2941.
3. *Данилов В. Н.* К вопросу о моделировании действия прямых преобразователей при излучении упругим напряжением на контролируемой поверхности / Дефектоскопия. — 1998. — № 8. — С. 20–27.

Поступила в редакцию
06.06.2003

ИТОГИ СЕМИНАРА ПО НК В БЕЛЕКЕ (Турция)

С 26 апреля по 3 мая 2003 г. в туристическом центре г. Белек (в 30 км от всемирно известной Анталии, Турция) Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики, НПФ «Диагностические приборы» и НПФ «Ультракон» провели Научно-практический семинар на тему «Современные аспекты организации неразрушающего контроля качества продукции на промышленном предприятии». Тематика докладов и сообщений семинара включала в себя: *Общие вопросы неразрушающего контроля качества продукции; Нормативно-техническое обеспечение деятельности служб; Приборное оснащение лабораторий НК; Вопросы подготовки и аттестации специалистов, аккредитация подразделений НК.* В семинаре приняли участие 31 специалист из Украины, России и Грузии, которые выступили с 15 докладами. Значительный интерес, проявленный к семинару — всего было подано около 80 заявок — был значительно снижен из-за военных действий в Ираке. Однако, по общему признанию участников, семинар удался и эксперимент может быть признан удачным.

Особый интерес участников семинара был проявлен к докладам известных в НК специалистов: проф., докт. техн. наук *Белокура И. П.* (Национальный авиационный университет, г. Киев), канд. техн. наук *Радько В. И.* (Ассоциация «Укрэксперт», г. Киев), *Балакирева П. А.* (ОАО «Мотор Сич»), *Павлия А. В.* (НПФ «Диагностические приборы», г. Киев), которые были посвящены вопросам организации неразрушающего контроля. Доклады проф., докт. техн. наук *Рыжикова В. Д.* (Центр радиационного приборостроения, г. Харьков), канд. техн. наук *Лозенко* (СКБ «Полисвит», г. Харьков), *Козина А. Н.* (НПФ «Диагностические приборы», г. Киев), *Павлия И. В.* (НПФ «Ультракон», г. Киев), *Мартыновского В. А.* («ДП-Тест», г. Киев) в основном касались вопросов разработки, внедрения и применения новых типов оборудования для НК. По общему мнению участников, семинар прошел на высоком организационном и техническом уровне.

Особенно высокой оценки были удостоены бытовые и природно-климатические условия проведения семинара — пятизвездочный отель «Бельконтис», среди хвойных и эвкалиптовых лесов, на самом берегу Средиземного моря. Почти полный состав участников семинара в один из дней принял участие в «выездном заседании» — была организована рыбалка и отдых с шашлыками из баранины и жареной форелью на берегу чудесного высокогорного озера. Также состоялся целый ряд других неформальных мероприятий, которые оставили прекрасные впечатления об этом райском уголке.

Надеемся, что новая встреча обязательно состоится весной следующего года!

*Александр Козин, Бюро Правления УО НКД,
НПФ «Диагностические приборы»*