

НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛЯ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ЭХО-АМПЛИТУДНОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ*

В. Ф. ДАВИДЕНКО (г. Киев)

Рассмотрено акустическое поле эхо-канала дефектоскопа, используемое в качестве измерительного инструмента для ультразвуковой эхо-амплитудной дефектометрии (УЭА), главным свойством которого является чувствительность поля (ЧП) в виде $B = \partial q / \partial v$ и три рода производных от нее по каждому из трёх независимых универсальных переменных поля (q, u, v), т.е. $B_1 = \partial B / \partial u$, $B_2 = \partial B / \partial v$, $B_3 = \partial B / \partial q$. Для каждого рода ЧП выделены их максимумы и определены: 1) положение временного окна (строба) для выделения полезных эхо-сигналов от эквивалентных отражателей; 2) точность измерения амплитуды эхо-сигналов для обеспечения требуемой точности УЭА и 3) момент считывания полезных эхо-сигналов в процессе ручного сканирования ОК.

Considered is the acoustic field of flaw detector echo-channel, used as the measurement tool for ultrasonic echo-amplitude flaw detection (UEA), the main property of which is field sensitivity (FS) in the form of $B = \partial q / \partial v$ and three kinds of its derivatives by each of the three independent universal variables of the field (q, u, v) [2], where $B_1 = \partial B / \partial u$, $B_2 = \partial B / \partial v$, $B_3 = \partial B / \partial q$. For each kind of FS their maximums were established and determined: 1) position of variable window (strobe) for pickup of useful echo-signals from equivalent reflectors), 2) accuracy of measurement of echo-signal amplitude to ensure the required accuracy of UEA and 3) moment of reading useful echo-signals during manual scanning of the object of control.

Современное понятие о чувствительности УЗ контроля [1] относится не к полю эхо-канала, о чем речь пойдет ниже, а к различным чувствительным элементам УЗ дефектоскопа — пьезоэлементу, усилителю эхо-сигналов, генератору зондирующих импульсов и даже к методам контроля в целом. При этом величина чувствительности оценивается неоднозначно: минимальными размерами реальных или эквивалентных отражателей, которые могут быть обнаружены при заданных или предельных настройках дефектоскопов, максимальными глубинами залегания отражателей известной величины в материалах с известными свойствами или отношением минимальной регистрируемой амплитуды эхо-сигнала к амплитуде зондирующего импульса. Такие представления о чувствительности не могут быть полезными для решения задач ультразвуковой эхо-амплитудной (УЭА) дефектометрии, так как не имеют четко установленной зависимости от параметров поля эхо-канала.

Если обратиться к известному источнику, регламентирующему использование термина «чувствительность» (ДСТУ 2681–94) как чувствительность средств контроля, к которым относятся средства и методы измерения (контроля), то необходимо сделать два замечания:

– автор статьи исходит из предположения о том, что поле эхо-канала, являясь своеобразным инструментом измерения размеров эквива-

лентных отражателей, отличается особой пространственной структурой, которая проявляется с помощью такого показателя как чувствительность поля (ЧП), обусловленная законами изменения двух независимых параметров эхо-сигналов — максимальной амплитуды и задержки. С помощью выявления взаимосвязей между независимыми параметрами эхо-сигнала и структурой поля решается задача измерения его размеров (поперечного сечения поля) при наивысшей чувствительности. При этом измеренное поперечное сечение поля как раз и соответствует понятию эквивалентного размера отражателя;

– введенная в ДСТУ 2681–94 мера оценки чувствительности как отношения изменения выходной величины к изменению входной величины, обуславливающей это изменение, автор принимает, но с дополнением о пределе малости входного изменения, соответствующем частной производной от функции выхода измерительной системы по входной переменной.

Поле эхо-канала (акустическое импульсное поле в среде с/без затухания звука, ограниченное по дальности параллельными излучателем-приемником и эквивалентным идеальным отражателем), представляемое как инструмент измерения (контроля), получено в работе [2] в виде энергетических уравнений в двух средах:

$$\begin{aligned} & \text{без затухания звука:} \\ & p = x[1 - \exp(-y^2/x^2)]; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \text{с затуханием звука:} \\ & q = 2i \exp(1 - 2u)[1 - \exp(-v^2/u^2)], \end{aligned} \quad (2)$$

* Статья публикуется в порядке обсуждения



где введены две группы по три универсальных безразмерных переменных:

в идеальной среде: (3)

$p = P/Q$ — базовая относительная амплитуда эхо-сигнала;

$x = r\lambda/d^2$ — относительная дальность эквивалентного отражателя;

$y = \sqrt{S}/d$ — относительный размер эквивалентного отражателя;

в реальной среде: (4)

$q = ngr$ — базовая относительная амплитуда эхо-сигнала;

$u = ngx = \delta r$ — базовая относительная дальность эквивалентного отражателя;

$v = ngy = \delta\sqrt{nS}$ — масштабный размер эквивалентного отражателя.

Три переменных в разных средах связаны единым масштабным коэффициентом ng , где $n = d^2/\lambda^2$ — диапазон активной площади пьезопластины; $g = \lambda\delta$ — удельное затухание звука на длине одной волны; P — амплитуда эхо-сигнала; Q — амплитуда базового опорного эхо-сигнала; d — диаметр пьезопластины, мм; λ — длина волны УЗ колебаний, мм; r — дальность эквивалентного отражателя, мм; δ — коэффициент затухания звука, 1/мм; S — площадь эквивалентного отражателя, мм².

Исходя из приведенного выше второго замечания к ДСТУ 2681–94, автор вводит новое понятие «чувствительность УЗ поля эхо-канала», определив его как частную производную от функции базовой относительной амплитуды эхо-сигнала по масштабному переменному размеру эквивалентного отражателя следующим образом:

чувствительность поля (ЧП) в идеальной среде:

$$\partial p/\partial y = B_{\text{и}} = 2(y/x)\exp(-y^2/x^2); \quad (5)$$

ЧП в реальной среде:

$$\partial q/\partial v = B_{\text{р}} = 4(v/u)\exp(1 - 2u - v^2/u^2). \quad (6)$$

Символами B_1, B_2, B_3 обозначим роды ЧП, которые могут быть различными в зависимости от поставленных условий их определения. Главными свойствами ЧП являются их максимумы, которые достигаются способами оптимизации:

максимум ЧП 1-го рода B_1 — $B_{1\text{max}}$ — за счет выбора оптимальной дальности u_{opt} для эквивалентного отражателя фиксированного размера v ;

максимум ЧП 2-го рода B_2 — $B_{2\text{max}}$ — за счет выбора оптимального размера v_{opt} эквивалентного отражателя на фиксированной дальности u ;

максимум ЧП 3-го рода B_3 — $B_{3\text{max}}$ — за счет выбора оптимальной комплексной базовой амплитуды эхо-сигнала q_{opt} на реальной дальности отражателя u .

Аргументация в пользу нового понятия ЧП усиливается тем, что она как бы автоматически адаптируется к переменным условиям УЭА де-

фектометрии, в то время как существующая пороговая чувствительность, хранимая через настройки всех параметров контроля, должна быть строго постоянной для обеспечения требуемой достоверности результатов контроля. Однако на практике невозможно сохранять постоянными такие динамические параметры, как акустический контакт или дальность отражателя при отсутствии временной регулировки чувствительности. С помощью ЧП поля эхо-канала обосновывается выбор главных параметров контроля: ширины временного окна (строба), дискретности измерения амплитуды эхо-сигналов и момента снятия показаний при ручном сканировании объекта контроля.

Далее проведена разработка методических указаний по выбору оптимальных параметров настройки УЭА дефектометрии на максимальную точность измерений размеров эквивалентных отражателей в реальных средах на основе максимальных значений ЧП всех родов, определяющих новые методы измерений (контроля), которые углубляют и усовершенствуют основной метод УЭА дефектометрии.

Методика расчета оптимальных временных окон (стробов) для измерения заданных размеров эквивалентных отражателей с максимальной ЧП. $B_{1\text{max}}$ определяется из условия:

$$\partial B_1/\partial u = 4(v/u^2)(2v^2/u^2 - 2u - 1) \times \times \exp(1 - 2u - v^2/u^2) = 0.$$

После подстановки $z = v/u$ и исключения членов, не превращающихся в 0, получено уравнение:

$$z^3 - 0,5z - v = 0, \quad (7)$$

имеющее действительный корень z_0 :

$$z_0 = 0,8 \{ [v + (v^2 - 1/54)^{1/2}]^{1/3} + [v - (v^2 - 1/54)^{1/2}]^{1/3} \}.$$

Из этого уравнения для заданных размеров эквивалентных отражателей v могут быть найдены оптимальные базовые относительные дальности по формуле $u_0 = v/z_0$.

Положения максимумов ЧП 1-го рода для соответствующих оптимальных базовых относительных дальностей и заданных размеров эквивалентных отражателей показано на рис. 1.

Эффективность использования оптимальных временных окон (стробов) для выделения эхо-сигналов от эквивалентных отражателей заданного размера иллюстрируется графическим изображением энергетической структуры поля в реальной среде на рис. 2, где пунктирной кривой изображена граница перехода выпуклостей поля в вогнутости (перегибы) или максимумов градиентов изменения амплитуды. Обычно применяемые окна для выделения эхо-сигналов по максимумам амплитуды находятся значительно ближе (в среднем почти в два раза) к преобразователю, чем ок-

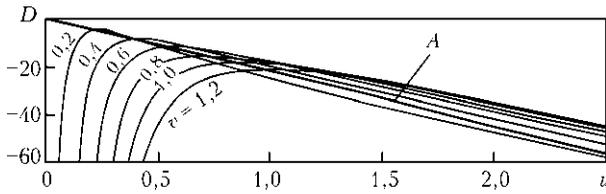


Рис. 1. Зависимость ЧП 1-го рода от масштабных размеров эквивалентных отражателей на разных базовых относительных дальностях

на, обеспечивающие максимумы ЧП 1-го рода или наибольшую точность дефектотрии.

Оптимальная величина u_0 не может быть выражена простой формулой, что затрудняет ее практическое использование. Однако можно получить не прямое решение задачи, определив масштабный размер эквивалентного отражателя из уравнения (7), т. е. $v = z^3 - 0,5z$. После подстановки $z = v/u_0$ получаем не прямое уравнение:

$$v = u_0 \sqrt{u_0 + 0,5}, \quad (8)$$

которое после подстановки физических значений вместо универсальных безразмерных запишем в виде:

$$\sqrt{nS} = r_{opt} \sqrt{\delta r_{opt} + 0,5}, \quad (9)$$

где выражение \sqrt{nS} названо *обобщенным размером эквивалентного отражателя*.

Практическое использование полученного результата удобно в виде номограммы, представленной на рис. 3.

Номограмма оптимальных дальностей связывает между собой пять физических величин поля эхо-канала (диаметр преобразователя d , длину волны λ , площадь эквивалентного отражателя в виде плоскостного отверстия S , коэффициент затухания звука в ОК δ , оптимальное расстояние отражателя r_{opt}) условием, обеспечивающим максимум ЧП 1-го рода. Эта номограмма может найти более широкое применение, если найти способ определения величины B_{1max} .

Для этого в формулу (6) для ЧП следует подставить условие (8), обеспечивающее максимум ЧП 1-го рода:

$$B_{1max} = 6,6 \exp(-3u_0) \sqrt{u_0 + 0,5}. \quad (10)$$

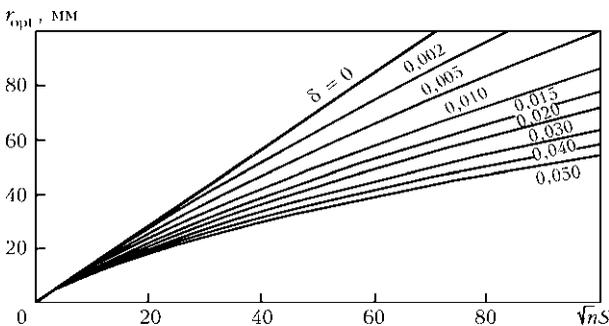


Рис. 3. Оптимальные дальности отражателей, соответствующие максимумам ЧП 1-го рода в зависимости от затухания звука в ОК

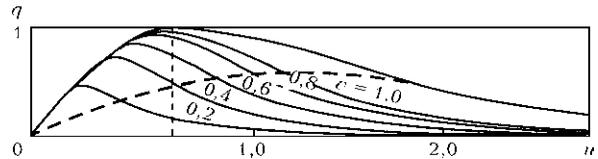


Рис. 2. Энергетическое поле эхо-преобразователя в реальной среде

Полученное уравнение в логарифмическом виде изображено линией *A* на рис. 1. Она имеет незначительную выпуклость и снижается с градиентом

$$dB_{1max}/du_0 = -(6u_0 + 2)/(2u_0 + 1). \quad (11)$$

На средних, обычных для УЗК, дальностях эквивалентных отражателей, например, для $u_0 = 0,8, \dots, 1,2$, градиент уменьшения максимумов 1-го рода ЧП составляет $-23 \dots -24$ дБ на базовую (единичную) дальность $\Delta L = 1/\delta$.

Существует возможность экспериментального определения коэффициента затухания звука в материалах при помощи прибора с программным управлением по следующей методике.

Если выполнить с помощью программного управления измерение ЧП 1-го рода по формуле:

$$B_1 = 10,87(\sqrt{nS}/r) \exp(-\delta r - nS/r^2), \quad (12)$$

то, перебирая значения δ при разных дальностях r и неизменных других параметрах эксперимента n, S , можно получить такое значение δ , при котором вертикальная прямая $\sqrt{nS} = \text{const}$ и горизонтальная прямая $r = r_{opt}$ пересекутся с наклонной кривой δ , имеющей такое же номинальное значение на приведенной номограмме.

Эту методику можно считать универсальной для любой триады «прибор–преобразователь–объект контроля».

При помощи ЧП 1-го рода можно определять ширину временного окна (строба) для выделения эхо-сигналов, необходимых для измерения размеров эквивалентных отражателей в заданном диапазоне размеров с достаточной точностью при отклонении чувствительности от максимума не более чем на заданную величину $\alpha, \%$.

Для этого уравнение (6) для ЧП 1-го рода приравнивается к заданному уровню чувствительности через привязку к максимуму, уменьшенную на величину $(1 - \alpha)$, т. е.

$$(v/u) \exp(-2u - v^2/u^2) = (1 - \alpha) \sqrt{u_0 + 0,5} \exp(-3u_0).$$

После подстановки условия максимума для B_{1max} $v = u_0 \sqrt{u_0 + 0,5}$ начальное уравнение упрощается:

$$(u_0/u) \exp[-2u - (u_0/u)^2(u_0 + 0,5) - 3u_0] = 1 - \alpha. \quad (13)$$

Подстановка численных значений оптимальных дальностей u_0 , связанных с задаваемыми ве-



личинами масштабных размеров эквивалентных отражателей, еще более упрощает уравнение (13), которое решается графоаналитическим методом и представлено на рис. 4. Крайними пунктирными линиями показаны границы стробов для разных эквивалентных размеров дефектов в зависимости от параметра $z_0 = v/u_0$.

Методика расчета необходимой и достаточной дискретности измерения амплитуды эхосигналов, влияющей на точность измерения размеров эквивалентных отражателей. Для решения поставленной задачи необходимо найти максимум ЧП 2-го рода, который определяется дифференцированием ЧП по масштабному размеру эквивалентного отражателя:

$$B_2 = \partial B / \partial v = (4/u)(1 - 2v^2/u^2) \exp(1 - 2u - v^2/u^2) = 0. \quad (14)$$

Отсюда оптимальное значение v_{opt} будет:

$$v_{opt} = u/\sqrt{2}. \quad (15)$$

После подстановки этого условия в формулу для ЧП (6) определяется максимум ЧП 2-го рода:

$$B_{2max} = 4,67e^{-2u}. \quad (16)$$

Далее запишем уравнение, выражающее изменения ЧП 2-го рода от изменений размеров эквивалентных отражателей, находящихся на фик-

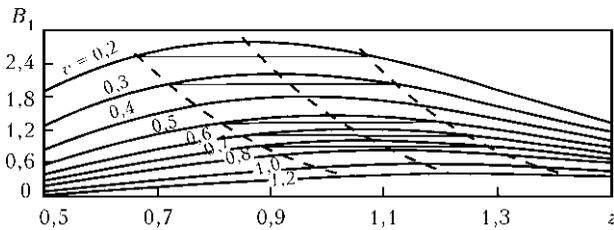


Рис. 4. Зависимость ширины и положения строба для выделения полезных эхосигналов для УЭА дефектотрии с заданной точностью

Таблица 1. Единые относительные кванты в зависимости от дискретности шкалы амплитуд, дБ

ΔD (дБ)	0,1	0,2	0,25	0,5
Δq	0,9886	0,9772	0,9716	0,9441

Таблица 2. Численное распределение уровней ЧП 2-го рода около их максимальных значений по линии оптимума $v_{opt} = 0,707u$

v	u									
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
0,1	0,389	0,298								
0,2	0,368	0,427	0,389	0,341						
0,3		0,368	0,427	0,419	0,389	0,357				
0,4			0,368	0,422	0,427	0,412	0,389	0,365	0,341	
0,5				0,368	0,416	0,429	0,423	0,408	0,389	
0,6					0,368	0,411	0,427	0,427	0,419	
0,7						0,368	0,407	0,425	0,429	
0,8							0,368	0,403	0,422	
0,9								0,368	0,400	
1,0									0,368	

сированных дальностях, в виде кривых в логарифмическом масштабе, которые касаются наклонной прямой B_{2max} , изображенной линией А на рис. 5:

$$4(v/u) \exp(1 - 2u - v^2/u^2) = 4,67 \exp(-2u), \quad (17)$$

где u — фиксированные значения.

Главная идея расчета погрешностей измерения размеров эквивалентных отражателей заключается в определении ширины сечения огибающей ЧП 2-го рода на уровне ниже ее максимума на единый относительный квант Δq (рис. 6), который пересчитывается в дискретную величину ΔD , являющуюся шагом равномерной шкалы амплитуд в отрицательных децибелах [3], следующей зависимостью:

$$-\Delta D = 8,686 \ln(\Delta q) \text{ дБ/пиксель или } \Delta q = 1,122^{-\Delta D}, \quad (18)$$

так как $\ln(\Delta q) = -\Delta D \ln 1,122 = -\Delta D / 8,686$.

При этом подразумевается, что все величины, связанные с энергетикой или амплитудой эхосиг-

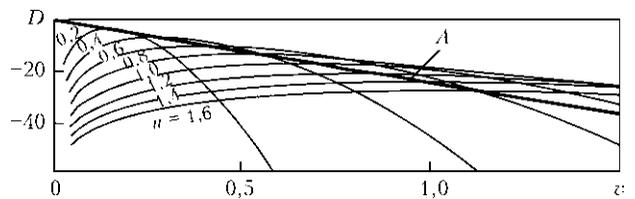


Рис. 5. Зависимость ЧП 2-го рода от масштабного размера эквивалентного отражателя на фиксированных базовых относительных дальностях

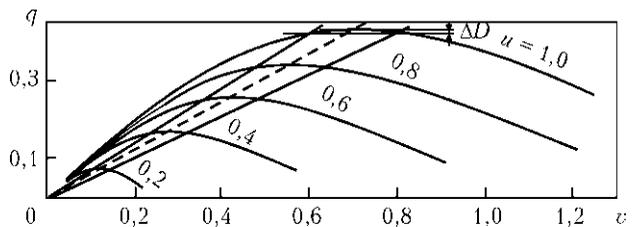


Рис. 6. Графо-аналитический анализ точности измерения масштабного размера эквивалентного отражателя

Таблица 3. Измерение величины эквивалентного отражателя на дальности $u = 0,4$

v	B_2
0,22	0,406
0,23	0,413
0,24	0,419
0,25	0,422
0,26	0,426
0,27	0,428
0,28	0,429
0,29	0,429
0,30	0,427
0,31	0,425
0,32	0,422
0,33	0,418
0,34	0,413

налов, подвержены пропорциональным изменениям, относительные величины которых измеряются от их собственных максимумов в единицах ΔD . Наиболее приемлемую для практических измерений дискретность амплитудных шкал выбирают из ряда: 0,1; 0,2; 0,25; 0,5 дБ/пиксель. Отсюда соответствующие значения единых относительных квантов можно получить из табл. 1.

Уравнения (17) для фиксированных дальностей логарифмированием и приравниванием к уровням максимумов ЧП 2-го рода, пониженным на один квант относительной шкалы Δq , преобразуются, упрощаются и принимают вид:

$$(v/u)\exp(-v^2/u^2) = 0,429\Delta q, \quad (19)$$

удобный для расчетно-цифрового анализа (см. табл. 2).

В табл. 2 представлено численное распределение величин ЧП 2-го рода с крупным шагом вблизи его максимального значения, которое демонстрирует разброс размеров эквивалентных отражателей или погрешность измерений масштабного размера эквивалентных отражателей.

Более точный численный расчет с меньшей дискретностью v позволяет обнаружить зависимость разброса размеров отражателей (погрешностей измерения) на уровне единого относительного кванта, связанного с дискретностью измерения величины эхо-сигналов. Это продемонстрировано на примере измерения размера эквивалентного отражателя на дальности $u = 0,4$ в табл. 3.

Оптимальный размер эквивалентного отражателя на дальности $u = 0,4$ равен $v_{opt} = 0,283$, а максимум ЧП 2-го рода = 0,429. Его понижение происходит в обе стороны от максимума на Δq и определяет ошибку дискретизации измерений, представленную для данного случая в табл. 4

Если сравнить данные табл. 3 и 4, то можно заметить, что разброс масштабных размеров эк-

Таблица 4. Шаги дискретизации измерений

ΔD (дБ)	0,1	0,2	0,25	0,5
$0,429\Delta q$	0,424	0,419	0,417	0,405

вивалентных отражателей увеличивается с увеличением шага квантования и составляет соответственно ± 10 ; ± 14 ; ± 18 ; ± 22 %.

На основании численного исследования возможностей нового понятия чувствительности поля в направлении точности измерения размеров эквивалентных отражателей можно сделать вывод о том, что при нормальной дискретности измерения амплитуды эхо-сигналов $\Delta D = -0,2$ дБ точность УЭА дефектометрии может быть на уровне $\pm 14 \dots 20$ %.

Методика определения оптимальных условий для съема показаний УЭА дефектомера в процессе ручного сканирования ОК на основании максимума ЧП 3-го рода. Для определения ЧП 3-го рода необходимо в формулу ЧП (6) подставить значения v , выраженные через параметры эхо-сигнала в виде формулы геометрической структуры поля эхо-канала [2]: $v = \pm u\sqrt{-\ln(1 - q e^{2u-1}/2u)}$, из которой следуют тождественные равенства:

$$\begin{aligned} v/u &= \sqrt{-\ln(1 - q e^{2u-1}/2u)}, \\ (v/u)^2 &= -\ln(1 - q e^{2u-1}/2u), \\ \exp(-v^2/u^2) &= 1 - q e^{2u-1}/2u. \end{aligned}$$

После соответствующих подстановок в формулу ЧП (6) для ЧП 3-го рода получим:

$$B_3 = (4e^{1-2u} (1 - q e^{2u-1}/2u)) \times \sqrt{-\ln(1 - q e^{2u-1}/2u)}. \quad (20)$$

Эта зависимость представлена на рис. 7 в логарифмическом масштабе по оси амплитуд, откуда видно, что максимумы ЧП 3-го рода находятся в диапазоне амплитуд эхо-сигналов от -8 до -20 дБ.

В формуле (20) в скобках перед корнем и под корнем квадратным появилось выражение:

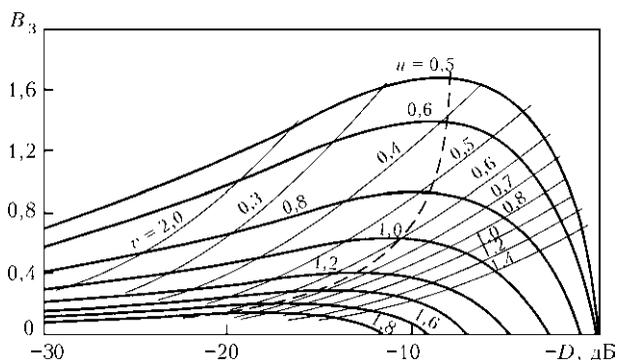


Рис. 7. Зависимость ЧП 3-го рода от базовой относительной амплитуды эхо-сигналов для разных дальностей эквивалентных отражателей (размеры эквивалентных отражателей показаны тонкими линиями)

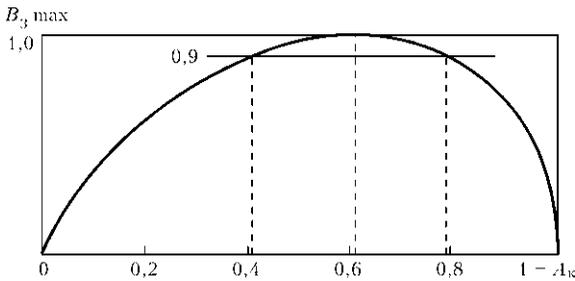


Рис. 8. Границы области оптимальных значений КБА

$$qe^{2u-1}/2u = A_k, \quad (21)$$

которое названо *комплексной базовой амплитудой (КБА) эхо-сигнала* и обозначено символом A_k . КБА объединяет оба параметра эхо-сигнала и в значительной мере подобна системе с временной регулировкой чувствительности (ВРЧ), усиливающей амплитуду эхо-сигнала в зависимости от времени его задержки и от коэффициента затухания ($u = \delta r$), однако без учета свойств отражателя.

После принятой подстановки выражение для ЧП 3-го рода принимает вид:

$$B_3 = (4e^{1-2u})(1 - A_k) \sqrt{-\ln(1 - A_k)}. \quad (22)$$

Максимум ЧП 3-го рода определяется дифференцированием:

$$\partial B_3 / \partial A_k = -\ln(1 - A_k) + 0,5 = 0,$$

откуда $1 - A_k = e^{-0,5} = 0,606$ или оптимальное значение $A_k = 0,394$.

После подстановки этого значения КБА в формулу (21) получено уравнение для границы области оптимальных параметров эхо-сигналов для УЭА дефектометрии:

$$q_{opt} = 2,14ue^{-2u}. \quad (23)$$

Исходя из вновь введенных понятий и численных характеристик, приобретает практическое значение видоизменение универсальной АРД-диаграммы и представление ее следующим выражением:

$$A_k = 1 - \exp(-v^2/u^2). \quad (24)$$

Его удобнее представлять в логарифмическом масштабе по оси КБА

$$D_k = 8,686 \ln[1 - \exp(-v^2/u^2)] \quad (25)$$

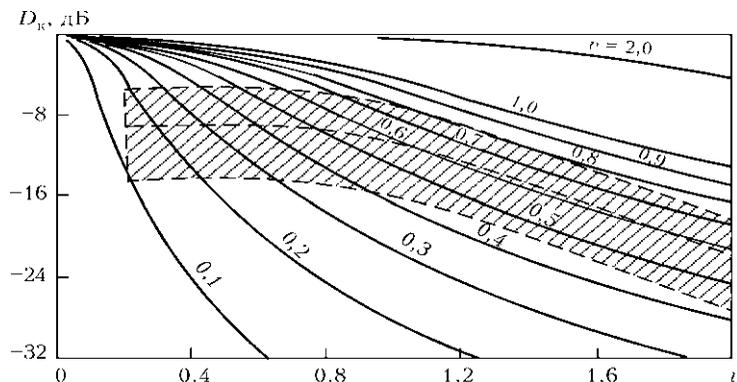


Рис. 9. Нормированная универсальная АРД-диаграмма

в графически развернутом виде сплошными линиями на (рис. 7) и называть *нормированной универсальной АРД-диаграммой*.

Нормированность АРД-диаграммы заключается в нанесении на поле АРД-диаграммы области значений ЧП 3-го рода на уровне 0,9 от максимального значения $B_{3max} = 0,429$ (рис. 8).

Область оптимальных значений КБА (заштрихована) находится между двумя граничными линиями (рис. 9), описываемыми уравнениями: $q_v = 1,2ue^{-2u}$ и $q_n = 3,2ue^{-2u}$, а средняя линия соответствует уравнению (21).

Из рис. 9 видно, что область масштабных размеров эквивалентных отражателей, измеряемых с достаточно высокой точностью, ограничена диапазоном $v = 0,4 \dots 0,8$. Для обычных задач УЗ дефектоскопии этот диапазон в размерах площади эквивалентных отражателей выражается следующим образом: $S = v^2/n\delta^2 = v^2\lambda^2/d^2\delta^2 = (0,16 \dots 0,64)\lambda^2/d^2\delta^2 = 5 \dots 100 \text{ мм}^2$ при условии: $n = 60 \dots 120$; $\delta = 0,01 \dots 0,02 \text{ 1/мм}$, что можно считать вполне достаточным для практических целей.

Дисплей форматом 256×256 пикселей может быть использован в качестве носителя нормированной универсальной АРД-диаграммы со следующими параметрами:

- шкала комплексных базовых амплитуд в диапазоне 0...-25 дБ с дискретностью шкалы КБА $\Delta D = 0,1 \text{ дБ}$;

- шкала базовых относительных дальностей в диапазоне 0...2 с дискретностью шкалы $\Delta u = 0,008$, что соответствует дискретности физических дальностей $\Delta r = 0,008/\delta = 0,4 \dots 0,8 \text{ мм}$ или дискретности времени $\Delta t = 0,3 \dots 0,6 \text{ мкс}$.

Рассмотрим графическое представление нормированной универсальной АРД-диаграммы на цифровом дисплее таким образом, чтобы изображение было достаточно четким и не мешало рассмотрению КБА-сканов. Программа электронного изображения может быть удобна благодаря возможности изменения масштаба дальности, но сложна и затеняющая КБА-сканы. Вероятно, целесообразным будет возврат к накладному прозрачному экрану, хотя и без регулирования



масштаба по дальности. Однако для оператора ручного контроля графическое изображение АРД-диаграммы на фоне КБА-сканов дает важные ориентиры для ощущения поля, которые ничем незаменимы. Кроме того, существенно снижается себестоимость прибора.

Выводы

На основе разработанной универсальной теоретической модели поля эхо-канала с описанием двух её сторон — энергетической и геометрической, с математическим описанием их при помощи трёх универсальных безразмерных переменных (q , u , v) в полном объеме поля в ближней и дальней зонах, во всех средах с затуханием и без затухания звука [2], раскрыты метрологические особенности поля эхо-канала, описываемые при помощи нового понятия — чувствительности поля (ЧП);

– под ЧП понимается частная производная от универсальной базовой безразмерной амплитуды эхо-сигнала q по универсальному обобщённому размеру эквивалентного отражателя v , а именно $B = \partial q / \partial v$;

– определены ЧП трех родов, развернутые по каждой из трех переменных: ЧП 1-го рода — $B_1 = \partial B / \partial u$; ЧП 2-го рода — $B_2 = \partial B / \partial v$; ЧП 3-го рода — $B_3 = \partial B / \partial q$;

– определены максимальные значения ЧП всех трёх родов с помощью правила оптимизации, когда производные приравниваются 0, откуда получены условия:

– оптимальной дальности u_{opt} для выделения полезных эхо-сигналов для измерения ожидаемых размеров эквивалентных отражателей с максимальной чувствительностью 1-го рода $B_{1\text{max}}$;

– оптимального обобщенного размера эквивалентного отражателя v_{opt} , который на заданной базовой дальности измеряется с максимальной чувствительностью 2-го рода $B_{2\text{max}}$;

– оптимальной базовой амплитуды эхо-сигнала q_{opt} от эквивалентного отражателя на фиксированной базовой дальности, который соответствует максимальной чувствительности 3-го рода $B_{3\text{max}}$ и воспринимается как сигнал окончания ручного сканирования отражателя и съема показаний для измерения размера эквивалентного отражателя;

– определена огибающая ЧП 2-го рода, которая на уровне одного относительного кванта ниже максимума указывает неопределённость размера эквивалентного отражателя, т.е. возможную ошибку его измерения при данной дискретности измерения амплитуды эхо-сигнала. Отсюда определена теоретическая ошибка УЭА дефектометрии, которая при дискретности измерения амплитуды $\Delta D = 0,2$ дБ может составлять 14...20 %;

– введен новый информационный параметр УЭА дефектометрии, учитывающий амплитуду и задержку эхо-сигнала, названный комплексной базовой амплитудой (КБА), который позволяет оперативно вводимые данные контроля в виде точек на экране от универсальной АРД-диаграммы;

– определены диапазоны оптимальных базовых амплитуд эхо-сигналов в зависимости от уровней ЧП 3-го рода, которые могут наноситься на экран дефектомера совместно с АРД-диаграммой в виде окрашенных областей.

1. Шербинский В. Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений. — М.: Тиссо, 2003. — 326 с.
2. Давиденко В. Ф. Об элементарной неволновой теории поля ультразвуковых преобразователей для импульсно-амплитудной дефектометрии // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2010. — № 3. — С. 29–37.
3. Давиденко В. Ф., Баженов В. Г. Новые принципы построения измерительных шкал ультразвуковых дефектоскопов // Зб. доповідей 6-ї Нац.наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика UkrNDT-2009» / Київ: УТ НКТД, 2009. — С. 132–136.

Поступила в редакцию
05.04.2011