

4. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

5. Шейнман Е. Л. Идентификация сигналов объектов в интегрированных системах подводного

наблюдения //Юбилейная науч.-техн. конф. «Проблемы прикладной гидроакустики», Таганрог, 2004. С. 27-32.

E. L. Sheinman, O. N. Shuvalova

A STUDY OF EFFECTIVENESS OF SIGNAL IDENTIFICATION ALGORITHMS AND DISTANCE ESTIMATIONS OF THE OBJECTS WHICH HAVE BEEN DETECTED IN SURVEILLANCE SYSTEMS, TAKING PLACE ON DISTANCE

Algorithms of signal identification of the objects, which have been detected in surveillance systems, taking place on distance from each other, and estimation of the object distance by a triangulation method, are considered. Conditions of algorithms applicability are determined.

Integration, identification, triangulation, efficiency, passive mode

УДК 620.179.161

К. Е. Аббакумов, Н. В. Степаненко

Моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков

Проведено моделирование электроакустического тракта теневого метода ультразвукового контроля при использовании бесконтактных датчиков. Получены результаты, на основе которых можно оценить влияние пространственной ориентации катушки датчика на результат контроля.

Ультразвуковой контроль, листовой прокат, теневой метод, электромагнитный акустический преобразователь

При проектировании большинства видов аппаратуры для дефектоскопии и других видов неразрушающего контроля с использованием упругих волн наибольшее предпочтение отдается варианту, связанному с получением и анализом уравнений электроакустического или акустического тракта.

Ультразвуковая дефектоскопическая аппаратура основана на принципах действия, связанных с особенностями распространения упругих волн в веществе контролируемого изделия. К таким особенностям относятся: рассеяние на неоднородностях, изменения скоростей распространения и поглощения ультразвука, эффект Доплера, флуктуации направления распространения волн при рефракции и др. Часть общего функционального приборного тракта, в котором осуществляется из-

меряемое взаимодействие ультразвука с веществом или объектом, принято называть акустическим трактом прибора [1], [2]. Понятие акустического тракта и способы его аналитического описания введены в практику инженерного проектирования дефектоскопической аппаратуры И. Н. Ермоловым в ряде работ [3]. Если в рассмотрение включаются процессы преобразования электрических сигналов в акустические, то образуется модель, которую принято называть электроакустическим трактом прибора. Эта характеристика наиболее полно учитывает возможности аппаратных средств уже с учетом согласования работы преобразователей не только с исследуемой средой, но и с электронными устройствами. Для удобства анализа иногда электроакустический тракт условно разделяется на 3 части: часть, связанная с режимом возбужде-

ния; часть, связанная с распространением ультразвука в среде (собственно акустический тракт); часть, связанная с режимом приема.

При построении модели и анализе ее работы для первой части обычно интересуются соотношением преобразования электрического сигнала, подаваемого на электроакустический преобразователь, в компоненты упругого поля (смещения или напряжения), действующие в активной зоне и определяющие режим излучения.

При построении модели для третьей части интересуются решением обратной задачи: какой электрический сигнал образуется на выходных зажимах электроакустического преобразователя при заданном распределении акустического воздействия на активной зоне при регистрации входящих ультразвуковых сигналов.

Наибольший практический интерес при использовании отработанных конструкций электроакустических преобразователей и способов ввода упругих волн в изделие вызывают результаты анализа акустического тракта, особенно если в него помещена подходящая модель, замещающая оцениваемую неоднородность.

Закономерности, свойственные акустическим трактам устройств разного функционального назначения, могут сильно отличаться друг о друга. Но всегда они, в основном, определяются характером акустического поля, возбуждаемого и принимаемого в среде используемым электроакустическим преобразователем. Известно влияние на структуру акустического тракта способа осуществления акустического контакта: прямой контактный или «щелевой», иммерсионный, контактный с акустической задержкой, бесконтактный, а также способа «прозвучивания»: теневой, эхометод, эхосквозной и их модификации [1], [2].

Приборы, реализующие сквозное прозвучивание, основаны в большинстве случаев на измерении времени распространения ультразвука в среде и степени его ослабления. При использовании поперечных, упругих волн возникает принципиальная возможность оценки указанных характеристик в зависимости от направления вектора упругих смещений, т. е. поляризации волны.

Измерительный канал таких приборов содержит, как правило, излучающий и приемный преобразователи, расположенные напротив друг друга в жидкости или по разные стороны на гранях (или вблизи граней) исследуемого объекта. В этом случае вырабатываемый приемником электрический сигнал будет пропорционален усредненному по его рабочей поверхности значению создаваемого излучающим преобразователем звукового давления в

жидкости или компонента упругого напряжения (смещения) в твердой среде на поверхности со стороны приемника.

На рис. 1 представлена схема формирования измерительного тракта дефектоскопа при использовании электромагнитно-акустических преобразователей (ЭМАП) для теневого метода ультразвукового контроля металлической пластины (образца).

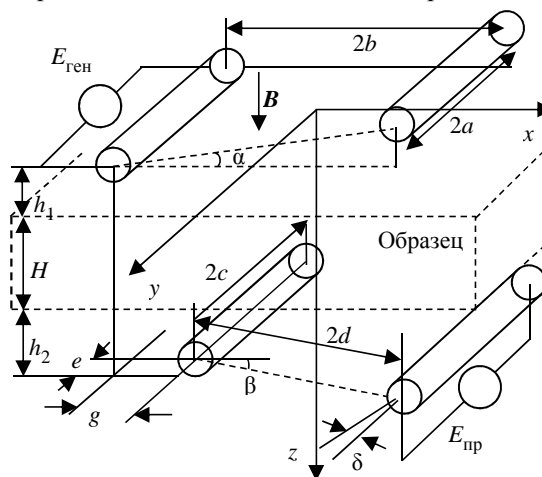


Рис. 1

Излучающая катушка преобразователя (ИК) ЭМАП расположена относительно декартовой системы координат (x, y, z) на расстоянии h_1 над поверхностью образца – металлической пластины толщиной H с плоскопараллельными гранями. Условно витки ИК изображены в виде набора «нитевидных» проводников. Они считаются замкнутыми за пределами рисунка и подключены к источнику возбуждающего электрического напряжения $E_{ген}$. Предполагается, что активная зона ИК имеет форму прямоугольника $2a \times 2b$. С противоположной ИК стороны пластины на расстоянии h_2 от ее поверхности располагается приемная катушка (ПК) ЭМАП, которая также имеет прямоугольную форму с размерами $2c \times 2d$. Витки ПК ориентированы в параллельной плоскости, согласно виткам ИК, но развернуты по отношению к ним на угол δ . Витки ПК предполагаются замкнутыми за пределами рисунка и образующими источник ЭДС $E_{пр}$. В рабочую зону ЭМАП для активизации поперечных волн подается «нормальное» (показано стрелкой) к поверхности магнитное поле с индукцией B . Кроме того, для имитации нарушенного расположения ИК и ПК в акустических системах реальных дефектоскопических устройств центр ПК предполагается смещенным относительно центра ИК на расстояния e и g по осям

«x» и «y» соответственно (для упрощения рисунка смещение показано по отношению к краю ИК) [4]. Для данной конструкции датчиков возможны отклонения плоскостей ИК и ПК от плоскости объекта контроля, для имитации этих отклонений введены углы α и β соответственно.

$$S(\{I\}, t) = \frac{iW_{\text{изл}}BF(h_{\text{изл}})}{2a\omega\rho c_t[R_{\text{изл}} - i\omega L_{\text{изл}}(1 - \exp(-\eta_{\text{изл}}h_{\text{изл}}))](1 - \frac{i\omega}{\sigma\mu_0 c^2})}, \quad (2)$$

При указанных на схеме направлениях витков (ИК и ПК), а следовательно, и протекающих по виткам токов, и вектора магнитной индукции векторы возникающих в металле упругих смещений (компонент тензора упругих напряжений) будут преимущественно ориентированы в направлении оси «y» (на рис. 1 не показаны). Такие же составляющие упругих смещений (напряжений) будут преимущественно преобразовываться, и затем регистрироваться в виде сигналов электрического напряжения на приемной катушке ЭМАП.

В соответствии с определением под уравнением электроакустического тракта будем понимать отношение сигнала, принятого приемным ЭМАП – $E_{\text{пр}}(t)$, к излученному передающим ЭМАП – $E_{\text{ген}}(t)$ при реализации теневого метода ультразвукового контроля (см. рис. 1). Тогда, как показано в [4], интересующее уравнение можно записать в виде произведения трех сомножителей:

$$\frac{E_{\text{пр}}(t)}{E_{\text{ген}}(t)} = S(\{I\}, t) * R(\{P\}, t) * E(\{A\}, t), \quad (1)$$

где $S(\{I\}, t)$ – обобщенный коэффициент преобразования в режиме излучения; $\{I\}$ – подмножество параметров режима излучения; $R(\{P\}, t)$ – обобщенный коэффициент преобразования в поле упругих волн, взаимодействующих с неоднородностью; $\{P\}$ – подмножество параметров для по-

Для схемы на рис. 1 выражение для коэффициента $S(\{I\}, t)$, с учетом материалов, можно записать, опуская временной множитель, в следующем виде:

где i – мнимая единица; $W_{\text{изл}}$ – число витков излучающей катушки; B – магнитная индукция; $2a$ – ширина рабочей зоны излучающей катушки; ω – частота ультразвука; ρ – плотность металла; c_t – скорость поперечных волн в металле; $R_{\text{изл}}$ – активное сопротивление излучающей катушки; $L_{\text{изл}}$ – индуктивность излучающей катушки; $\eta_{\text{изл}}$ – параметр ослабления при удалении излучающей катушки от поверхности металла; $h_{\text{изл}}$ – высота излучающей катушки над поверхностью металла; σ – электропроводность металла; μ – относительная магнитная проницаемость металла; μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость; c – скорость электромагнитных волн в вакууме.

Функция $F(h_{\text{изл}})$ учитывает неравномерность распределения вихревого тока под витками излучающей катушки и его ослабление при удалении излучающей катушки от поверхности металла на высоту $h_{\text{изл}}$ [4]. При отклонении плоскости ИК на угол α относительно поверхности объекта контроля (ОК) функция распределения плотности токов будет иметь следующий вид:

$$F(x, y, \alpha, h_{\text{изл}}) = F_x(x, \alpha, h_{\text{изл}})F_y(x, y, \alpha, h_{\text{изл}}), \quad (3)$$

где

$$F_x(x, \alpha, h_{\text{изл}}) = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \left(\frac{b-x}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha} \right) - \arctg \left(\frac{-b-x}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha} \right) \right],$$

$$F_y(x, y, \alpha, h_{\text{изл}}) = \frac{1}{\pi} \left[\arctg \left(\frac{a-y}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha} \right) - \arctg \left(\frac{-a-y}{h_{\text{изл}} + (b+x)\sin\alpha} \right) \right].$$

ля упругих волн; $E(\{A\}, t)$ – обобщенный коэффициент преобразования в режиме приема; $\{A\}$ – подмножество параметров режима приема; t – время.

На рис. 2 представлен вид функции распределения (в центральной плоскости) плотности вихревых токов в активной зоне ЭМАП прямоугольной формы 7,5×7,5 мм, частота ультразвука 1 МГц, материал – сталь (сплошная линия – воз-

душный зазор 0,1 мм, отклонение ИК на 10° относительно ОК, пунктир – воздушный зазор 0,1 мм, отклонение ИК отсутствует). На рис. 3 показана характеристическая поверхность распре-

$$N(x_1, y_1, z) = \frac{\cos \varphi \cos \theta (1 - 2 \sin^2 \theta)}{(2 \sin^2 \theta - 1)^2 + 4 \sin^2 \theta \cos \theta \sqrt{\left(\frac{c_t}{c_l}\right)^2 - \sin^2 \theta}};$$

ления плотности вихревого тока при отклонении ИК на 10° относительно ОК.

Выражение для коэффициента $E(\{A\}, t)$ запишется в виде

$$E(\{A\}, t) = \frac{(1 + i)\omega W_{\text{пр}}(2d) \exp(-\eta_{\text{пр}} h_{\text{пр}})}{\left(1 - \frac{i\omega}{\sigma \mu_0 c^2}\right)}, \quad (4)$$

где $W_{\text{пр}}$ – число витков приемной катушки ЭМАП; $2d$ – ширина рабочей зоны приемной катушки ЭМАП; $\eta_{\text{пр}}$ – параметр ослабления при

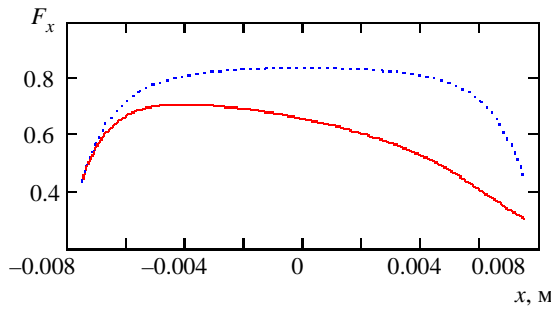


Рис. 2

удалении приемной катушки от поверхности металла; $h_{\text{пр}}$ – высота приемной катушки над поверхностью металла.

Выражение $R(\{P\}, t)$ представляет собой отношение тангенциальных компонент тензора упругих напряжений в рабочих областях приемной $\sigma_{xz \text{ пр}}(\{P\}, t)$ и излучающей $\sigma_{xz \text{ изл}}(\{P\}, t)$ катушек ЭМАП. Для схемы на рис. 1 это выражение может быть приведено к следующему виду:

$$\frac{\sigma_{xz \text{ пр}}}{\sigma_{xz \text{ изл}}} = \frac{if \cos \delta}{4cdc_t} \int_{-d}^d \int_{-c}^c \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{\exp\left[i \frac{\omega}{c_t} R(x_1, x_2, y_1, y_2, z)\right] N(x_1, y_1, z)}{R(x_1, x_2, y_1, y_2, z)} dx_2 dy_2 dx_1 dy_1, \quad (5)$$

где

$$R(x_1, y_1, x_2, y_2, z) = \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + z^2 \right]^{1/2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{y_1}{x_1}; \quad \theta = \arctg \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{z}.$$

Остальные обозначения в формуле (5) ясны из рис. 1. Для удобства вычислений по формулам (1)–(5) в них выделялся нормирующий безразмерный множитель, на который делилась левая

часть выражения (1). Полученное безразмерное выражение $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ и использовалось далее для численных оценок. Выражение (5) в данном случае определяет относительный уровень прошедшего через металлический лист сигнала на бездефектном месте. Для учета наличия дефекта в измерительном тракте необходимо ввести соответствующую модель неоднородности, в качестве которой может служить, например, модель «расслоения» в виде «тонкого» слоя с плоскопараллельными границами инородного, по отношению к металлу, вещества.

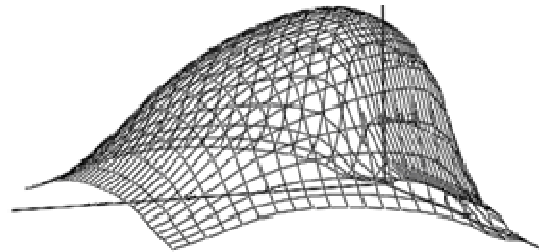


Рис. 3

На рис. 4 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ в зависимости от расстояния z в измерительном тракте, а также от параметров смещения и поворота ИК и ПК друг относительно друга и соотношения размеров сторон ИК и ПК, с учетом реального распределения плотности вихревых токов в активной зоне ЭМАП при зазоре 1 мм. Размеры активных зон ИК и ПК ЭМАП одинаковы (15×15 мм); рабочая

частота $f = 1.0$ МГц [(—) – смещение и поворот отсутствуют; (⋯⋯) – смещение равно 3.75 мм по обеим осям, поворот отсутствует; (---) – угол поворота равен $\pi/8$; (-·-) – смещение равно 3.75 мм, угол поворота равен $\pi/8$].

На рис. 5 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{\text{тен}}\{\dots\}$ при вводе угла от-

клонения плоскости ИК от плоскости ОК с учетом реального распределения плотности вихревых токов в активной зоне ЭМАП при зазоре 1 мм; размеры активных зон ИК и ПК ЭМАП одинаковы (15×15 мм); частота $f = 1.0$ МГц [(—) – отклонение отсутствует; (····) – отклонение ИК на 5° относительно ОК].

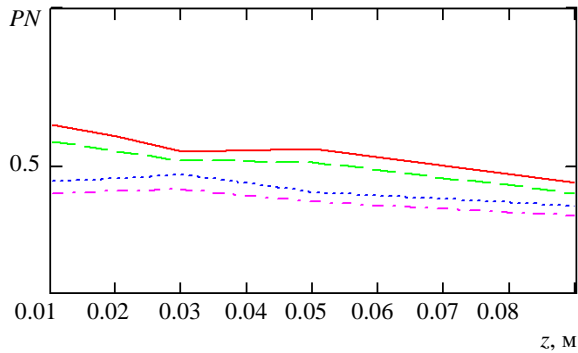


Рис. 4

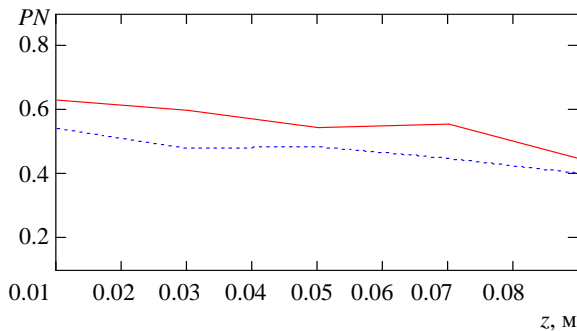


Рис. 5

Отметим, прежде всего, немонотонный спад полезного сигнала с расстоянием, что объясняется интерференционными явлениями. Несмотря на сложный характер возникающего акустического поля отклонение ИК относительно ОК заметно, но не слишком велико и вызывает вариации сигналов в пределах нескольких децибел. Вместе с тем, это позволяет существенно упростить требования к проектированию многоканальных акустических систем по сравнению с пьезоэлектрическими преобразователями, для которых существенной проблемой является соблюдение компланарности пьезоэлементов. Стоит отметить, что влияние отклонения ИК значительно возрастает при увеличении угла α .

На рис. 6 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{тен}\{\dots\}$ в зависимости от угла отклонения ИК (α) и ПК (β) относительно плоскости ОК; рабочая частота $f = 1.0$ МГц.

Видно, что амплитуда теневого сигнала быстро убывает с увеличением угла α . При конструировании автоматизированных систем контроля стоит ограничить максимальное допустимое отклонение излучающего датчика относительно ОК значением 10°.

На рис. 7 приведены результаты численных оценок выражения $PN_{тен}\{\dots\}$ в зависимости от угла поворота (δ) и значения смещения (g) ПК относительно ИК.

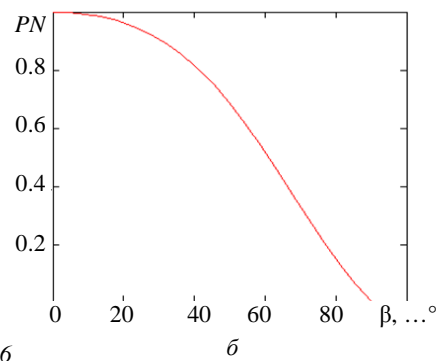
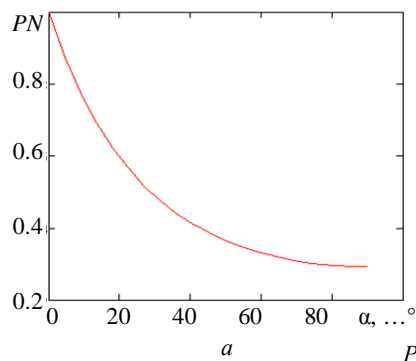


Рис. 6

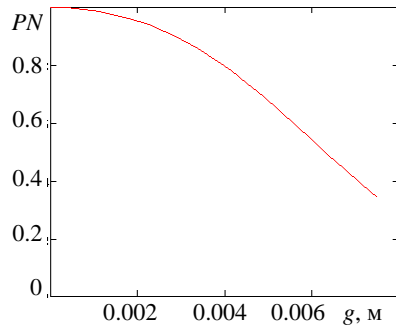
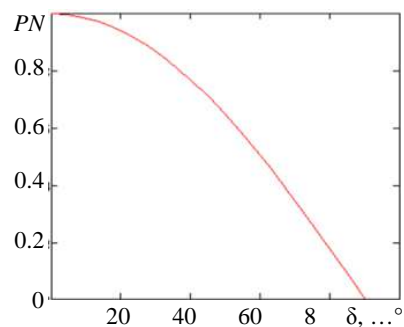


Рис. 7

При расчете уровня «теневого» сигнала в случае отклонения катушек от образца в постоянном магнитном поле опущена составляющая, появляющаяся за счет магнитострикционных механизмов преобразования при увеличении углов α и

β , поскольку она становится значимой при значениях углов больше 45° , что в свою очередь означало бы изменение в конструкции датчика. Данная же статья посвящена возможным отклонениям в рамках одной конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев А. С., Паврос С. К. Акустическое поле искателей ультразвуковых дефектоскопов: Конспект лекций / ЛЭТИ. Л., 1975.

2. Паврос С. К., Жарков К. В. Акустический тракт ультразвуковых контрольно-измерительных приборов: Учеб. пособие / ЛЭТИ. Л., 1980.

3. Ермолов И. Н. Методы расчета акустического тракта ультразвукового дефектоскопа. 1. Акустиче-

ское поле нормального контактного искателя // Дефектоскопия. 1967. № 3. С. 41–50.

4. Аббакумов К. Е., Кириков А. В. Моделирование электроакустического тракта с бесконтактными преобразователями для теневого метода контроля // Тез. докл. XVII Российской науч.-техн. конф. с международным участием «Неразрушающий контроль и диагностика», Екатеринбург, 5–11 сент. 2005 г. С. 131–132.

K. E. Abbakumov, N. V. Stepanenko

ELECTRO-ACOUSTIC PATH MODELING FOR SHADOW METHOD ULTRASONIC TESTING USING EMAT

The modeling of electro-acoustic path of the shadow method of ultrasonic testing using EMAT. Results have been obtained on the basis of which to assess the impact of the spatial orientation of the transducer coil on the testing result.

Ultrasonic testing, rolled sheet, shadow method, electromagnetic acoustic transducer
