УДК 620. 179. 16: 620. 179. 17

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Г.М. Сучков, А.В. Десятниченко

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, тел. 8-098-59-500-58, e-mail: suchkov_gm@mail.ru

Досліджено електро-акустичний тракт електромагнітно-акустичного товщіноміра. Встановлено доцільність контролю товщини пакетними імпульсами із максимальною енергією.

Исследовано електро-акустичний тракт электромагнитно акустического товщиномиру. Установлена целесообразность контроля толщины пакетными импульсами с максимальной энергией.

The electronic path of an acoustic measuring instrument of a thickness has been investigated. The expediency of the control of a thickness by package impulses with the maximum energy has been established.

В настоящее время исследованиям и разработкам приборов неразрушающего контроля толщины уделяется значительное внимание [1-9]. Перспективными среди них являются толщиномеры, основанные на бесконтактном возбуждении и приеме акустических импульсов. Выполнены значительные работы по теоретическому обоснованию положений, связанных с преобразованием электромагнитной энергии в акустическую и обратно [3-4]. В то же время процессы, происходящие в контролируемом изделии с учетом свойств электромагнитно-акустическим **(**ЭМА) преобразователей (ЭМАП), имеют значение и требуют рассмотрения [5]. Особенно это важно при контроле изделий малой толщины [6].

Подавляющее число традиционных портативных толщиномеров при контроле тонких изделий для возбуждения пьезоэлектрических [7] и ЭМА преобразователей [8] применяют короткие импульсы ударного типа. В работе [9] показано, что для обеспечения достаточной чувствительности контроля необходимо применять пакетные импульсы с высокой частотой заполнения (до 6 МГц и более, сдвиговые волны). Достаточных сведений об оптимизации имеющегося противоречия в литературных источниках не обнаружено, поэтому настоящая работа является актуальной.

Проблемность поставленных вопросов обуславливается экономической целесообразностью контроля ЭМА способом изделий с поверхностью пораженной коррозией, влиянием анизотропии изделия на результаты контроля т.д. Малые времена распространения акустических импульсов требуют создания моделей и пояснения физической сущности процессов толщинометрии с учетом результатов работ [3-4]. Основными среди них, на наш взгляд, являются решения задач по определению необходимых энергетических параметров комплекса: генератор – ЭМАП – изделие – предварительный усилитель. Для этого необходимо связать энергетические параметры комплекса с максимальной контролируемой толщиной или связанной с ней величиной. Далее, осуществив переход к малой толщине, мы можем гарантировано обеспечить достаточную величину отношения нужных донных импульсов и шума. Дополнительные возможности можно обеспечить за счет современных методов обработки информации [10].

Для лучшего понимания процесса контроля исследования выполним поэтапно.

На первом этапе рассмотрим вариант измерения толщины теневым методом. Реализуем раздельную схему включения возбуждающего и принимающего ЭМА преобразователей. Применим длинный импульс, т.е. такой, который заполняет пространство от

излучателя до приемника. Рассматриваемая часть толщиномера (рис. 1) состоит из генератора-формирователя импульсов 1, усилителя мощности 2 этих импульсов, возбуждающего ЭМАП 3, изделия 4 толщиной H, приемного ЭМАП 5 и предварительного усилителя ПУ 6. Пусть генератор толщиномера имеет мощность $W_Г$, а усилитель мощности зондирующих импульсов – коэффициент усиления равный $K_Г$. Рабочая зона ЭМАП (излучающая площадка 7 изделия под ним) имеет эффективную площадь $S_Г$ (поз. 8). Ее эффективная способность выражается площадью $S_{ПР}$. В общем случае возбуждающий и приемный ЭМАП не располагаются соосно по высоте изделия.

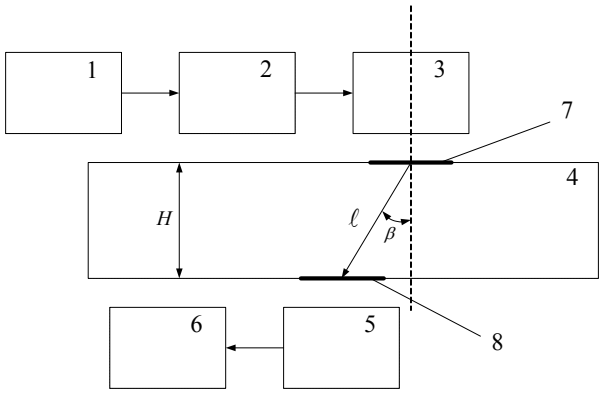


Рисунок 1 – Модель для пояснения теоретических расчетов при использовании длинноимпульсного теневого метода контроля толщины

Плотность мощности $P_{ПР}$ акустического поля в рабочей зоне приемного ЭМАП определим как отношение мощности $W_Г$ увеличенной на $K_Г$ к площади рассеяния энергии на поверхности на расстоянии ℓ. Если рассматривать передающий преобразователь как идеальный точечный источник излучающий во все стороны с равной интенсивностью, то его площадь рассеяния будет равна $4\pi\ell^2$. Однако такое допущение не учитывает характера достаточно узкой диаграммы направленности ЭМАП [5], поэтому более рациональным представляется принять распределение акустической энергии, используя модель в виде конуса. В этом случае площадь будет определятся как $2\pi\ell^2 tg^2\Delta\beta$. Очевидно, что геометрические и конструктивные параметры датчика будут определять характер этой величины, поэтому в общем случае обозначим ее как $M_Г\ell^2$. Тогда

$$P_{ПР} = \frac{W_Г K_Г \delta}{M_Г \ell^2},$$

где δ – величина ослабления энергии акустических импульсов в материале изделия. Принятая ЭМАП 5 и усиленная ПУ мощность будет такой:

$$W_{ПР} = P_{ПР} S_{ПР} = \frac{W_Г K_Г S_{ПР} \delta}{M_Г \ell^2}. \qquad (1)$$

Воспользуемся известным в радиолокации соотношением [10]:

$$S_{ПР} = \frac{K_{ПР}\lambda^2}{4\pi}, \qquad (2)$$

где λ – длина волны акустических колебаний, $K_{ПР}$ – коэффициент усиления ПУ. Тогда

$$W_{ПР} = \frac{W_Г K_Г K_{ПР} \lambda^2 \delta}{4\pi M_Г \ell^2}, \qquad (3)$$

откуда определяем максимальное расстояние от рабочей зоны возбуждающего ЭМАП до приемного, при котором эта модель еще может работать:

$$\ell = \sqrt{\frac{W_Г K_Г K_{ПР} \lambda^2 \delta}{4\pi M_Г W'_{ПР} \gamma}}, \qquad (4)$$

где γ – поправочный коэффициент на воздействие неучтенных факторов, $W'_{ПР}$ – реальная чувствительность ПУ. При уменьшении значения ℓ полученное выражение будет определять степень чувствительности контроля или соотношения сигнал/шум.

Реальную чувствительность приемника определим согласно работе [11] таким образом:

$$W'_{ПР} = \rho k T_\Sigma \Delta f_Ш \qquad (5)$$

где ρ – установленное нормативно-технической документацией минимальное допустимое превышение полезного сигнала над шумом по мощности; $\Delta f_Ш$ – шумовая полоса приемника; k – постоянная Больцмана; T_Σ – суммарная шумовая температура, состоящая из собственной шумовой температуры ЭМАП, передающего тракта, ПУ, внешних источников.

Она определяется как температура сопротивления, равного входному сопротивлению ЭМАП, при котором мощность шума от внешнего источника и шума сопротивления одинаковы [12].

Воспользовавшись (5) и (4), получим, что

$$\ell = \sqrt{\frac{W_Г K_Г K_{ПР} \lambda^2 \delta}{4\pi M_Г \rho k T_\Sigma \Delta f_Ш \gamma}}.$$

Воспользуемся известным тригонометрическим выражением и определим H, зная угол β наклона оси акустического поля, сформированного ЭМАП по отношению к поверхности ввода (рис. 1):

$$H = cos\beta \sqrt{\frac{W_Г K_Г K_{ПР} \lambda^2 \delta}{4\pi M_Г \rho k T_\Sigma \Delta f_Ш \gamma}}.$$

Известно, что для оптимального фильтра [13]

$$\Delta f_Ш \approx 1/\tau_И , \qquad (6)$$

где $\tau_И$ – длительность возбуждаемого акустического импульса.

Тогда

$$H = cos\beta \sqrt{\frac{E_Г K_Г K_{ПР} \lambda^2 \delta}{4\pi M_Г \rho k T_\Sigma \gamma}}, \qquad (7)$$

где $E_Г = W_Г \tau_И$ – энергия сигнала, возбуждаемого ЭМАП.

Следовательно при оптимальной фильтрации [10], расстояние, на котором принимается достаточный по мощности полезный импульс, связано в основном с энергией возбуждаемого акустического сигнала и не зависит от его формы – короткий или имеющий заданную длительность и структуру. Этот фундаментальный вывод совпадает с результатами работ [13–15] для радиолокации и связи.

Преобразуем выражение (7), применив (2):

$$H = cos\beta \sqrt{\frac{E_Г S_Г S_{ПР} \delta 4\pi}{M_Г \rho k T_\Sigma \gamma \lambda^2}}. \qquad (8)$$

Из формул (7) и (8) следует, что чувствительность приема акустического импульса ЭМАП зависит от длины волны λ возбуждаемых колебаний. Для портативных толщиномеров достаточно жестко ограничен размер рабочих зон возбуждаемого и принимаемого ЭМАП, а коэффициенты усиления $K_Г$, $K_{ПР}$ могут варьироваться в довольно широких пределах. Следовательно, необходимо воспользоваться формулой (8). Тогда при уменьшении длины волны акустических колебаний, чувствительность контроля при постоянстве прочих условий будет увеличиваться. Если имеется возможность увеличивать рабочие поверхности ЭМАП, то следует применять формулу (7). Такой вариант позволит увеличивать чувствительность автоматического контроля, например, листов.

Поскольку мы не определяли структуру акустического импульса, то он может быть пакетным – с высокой заполняющей частотой, или коротким импульсом типа «дельта» – содержащим высокочастотные компоненты спектра, или импульсом со сложной внутренней структурой (такой импульс обладает наибольшей энергией).

Чаще к изделию доступ возможен только с одной поверхности. Возможно использование совмещенного ЭМАП. Рассмотрим упрощенную модель акустического тракта для такого случая. В качестве отражающей поверхности возьмем точечный отражатель на противоположной (донной) поверхности изделия – простую модель коррозионного повреждения. Эта задача более сложная, чем выше рассмотренная. Основная трудность заключается в определении плотности мощности акустического поля, отраженного точечной неоднородностью на донной поверхности. Ее диаграмма направленности имеет многолепестковую структуру. Это приводит к тому, что небольшое изменение угла облучения или изменение угла наклона акустической оси приводит к изменению отраженной мощности в направлении приемного ЭМАП с сотни раз. Для преодоления этой трудности обычно применяют специальную характеристику – эффективное сечение S_C рассеяния [16]. Его определяют как площадь изотропного дефекта (коэффициент отражения во все стороны равен 1), который в среднем отражает в направлении приемного ЭМАП такую же мощность, как и объект, имеющийся на донной поверхности изделия. Эта характеристика обычно определяется для конкретных объектов контроля в зависимости от состояния донной поверхности (шероховатость, коррозия и т.д.).

Пусть генератор толщиномера имеет мощность $W_Г$, а усилитель мощности зондирующих импульсов – коэффициент

усиления равный $K_Г$. Формируемое акустическое поле облучает донный отражатель, находящийся на расстоянии ℓ. По аналогии с (1), плотность мощности переотраженных от изотропного отражателя акустических волн, т.е. вторичного излучателя будет такой:

$$W_{ОТР} = \frac{W_Г K_Г S_С \delta}{M_Г \ell^2}. \qquad (9)$$

С учетом (9), а также (1) и (2), плотность мощности отраженного акустического сигнала на ЭМАП при приеме будет иметь вид:

$$W_{ПР} = \frac{W_{ОТР}\delta}{M_{ОТР}\ell^2} S_{ПР} = \frac{W_Г K_Г K_{ПР} S_С \lambda^2 \delta^2}{4\pi M_Г M_{ОТР} \ell^4}, \quad (10)$$

где $M_{ОТР}\ell^2$ – площадь рассеяния энергии при точечном отражателе.

Из (10) следует, что принятая энергия акустического поля в случае точечного отражателя на донной поверхности убывает пропорционально четвертой степени расстояния.

Связь расстояния до отражателя с параметрами толщиномера определим аналогично (7) или (8):

$$H = cos\beta \sqrt[4]{\frac{E_Г K_Г K_{ПР} S_С \lambda^2 \delta^2}{4\pi M_Г M_{ОТР} \rho k T_\Sigma \gamma}}. \qquad (11)$$

Очевидно, что и в этом случае максимально возможная контролируемая толщина определяется прежде всего энергией акустического импульса.

Приведенные ранее соображения о зависимости чувствительности контроля при фиксированной толщине изделия от длины волны справедливы и в этом случае.

В реальной ситуации контроля отражающая донная поверхность имеет протяженный характер. Рельеф отражающей поверхности сложный, а его характеристики случайные. Построить удовлетворительную математическую модель и получить приемлемую количественную информацию не удается. Поэтому основным источником такой информации являются предварительные исследования на конкретных объектах с учетом характера коррозионных повреждений или шероховатости донной поверхности.

Для рассматриваемых здесь соотношений удовлетворительный результат может дать модель, представляющая донную поверхность в виде большого числа случайно расположенных отражающих элементов. Но следует использовать ограничение о независимости отраженных ультразвуковых сигналов от каждого такого элемента. Тогда фазы отраженных элементарных сигналов будут независимы и их можно суммировать по мощности, образуя среднюю мощность отраженных донной поверхностью волн. Результирующая мощность будет пропорциональна числу элементарных отражателей, т.е. поверхности $S_{ПЛ}$, на которую воздействует акустическое поле созданное ЭМАП. Кроме того, эта мощность помимо размеров отражающей площадки будет зависеть от длины волны, угла раскрытия диаграммы направленности и наклона акустической оси, направления поляризации (для сдвиговой волны) и др. Характеристики донной поверхности также будут влиять на принятую ЭМАП мощность. Тогда можно по аналогии с [16] ввести интегральную характеристику – приведенное сечение рассеивания σ_0, которое характеризует эффективную площадь рассеяния единицы донной поверхности облучаемой акустическим полем.

Следует отметить, что использование приведенного сечения рассеяния будет эффективно лишь при относительной однородности отражающих свойств донной поверхности в пределах облучаемой ультразвуком площадки и отсутствии на ней интенсивно отражающих одиночных точечных объектов. При дальнейшем рассмотрении будем считать, что основной вклад в отражаемую мощность будет иметь зона акустического поля близлежащая к акустической оси. Такое приближение правомерно, т.к. диаграмма направленности ЭМАП как правило имеет незначительное раскрытие [17]. В этом случае эффективное сечение рассеивания отражающей площадки можно выразить в таком виде:

$$\sigma_{ПЛ} = \sigma_0 S_{ПЛ}. \qquad (12)$$

Учитывая, что сечение рассеивания отражающей площадки может изменяться в сотни раз, перейдем к получению энергетических соотношений. Специфику использования длинного и короткого импульсов рассмотрим раздельно. Для длинноимпульсного режима излучения ЭМАП основные геометрические параметры модели приведены на рис. 2.

Воспользуемся (10) и (12) и запишем выражение для мощности сигнала на ЭМАП при приеме:

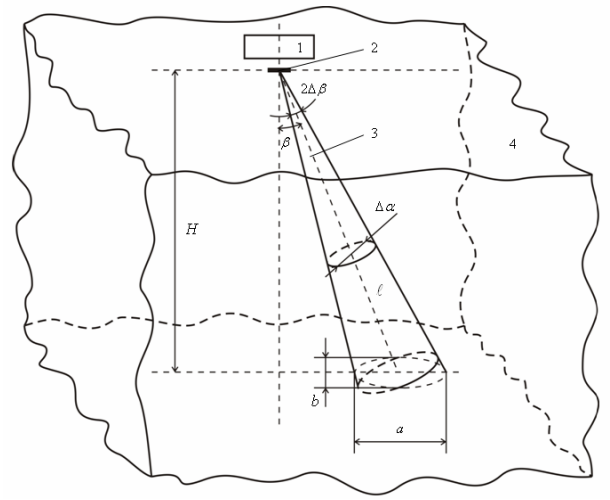
$$W_{ПР} = \frac{W_Г K_Г K_{ПР} \sigma_{ПЛ} \lambda^2 \delta^2}{4\pi M_Г M_{ОТР} \ell^4}.$$

В отличие от ранее рассмотренного точечного отражателя при заданном раскрытии диаграммы направленности акустического поля излучаемого ЭМАП, эффективное сечение рассеяния будет зависеть от расстояния до отражающей донной поверхности. Преобразуем выражение для мощности сигнала, обозначив коэффициентом A все неизменяемые параметры ЭМАП и донной поверхности:

$$W_{ПР} = A \frac{S_{ПЛ}}{H^4}, \qquad (13)$$

где

$$A = \frac{W_Г K_Г K_{ПР} \lambda^2 \delta^2 \sigma_0}{4\pi M_Г M_{ОТР}} cos^4 \beta .$$



1 – ЭМАП, 2 – рабочая зона ЭМАП, 3 – акустическое поле ЭМАП, 4 – исследуемый образец толщиной H

Рисунок 2 - Схема, поясняющая расчет толщины образца при излучении акустических волн в виде длинных импульсов

В общем случае поверхность акустического поля в плоскости нормально акустической оси представляет собой окружность с диаметром $\Delta\alpha$. На донной поверхности эта окружность преобразуется в эллипс с осями a и b. Элементарные математические преобразования и учет того, что площадь эллипса пропорциональна квадрату расстояния, позволяют установить связь между мощностью принятого излучения и толщиной исследуемого изделия:

$$W_{ПР} = \frac{AB}{H^2} cos^2 \beta, \qquad (14)$$

где

$$B = \frac{\pi}{4} \frac{\Delta\alpha \Delta\beta}{cos\beta}.$$

Следовательно, в отличие от точечного донного отражателя, мощность сформированного донной поверхностью акустического поля длинного сигнала на приемном ЭМПАП убывает со второй степенью толщины изделия. Т.к. толщина изделия определена изначально, то при ее уменьшении возрастает мощность сигнала на приемном ЭМАП. Чувствительность контроля при прочих равных условиях повышается.

Важным с энергетической точки зрения для портативных толщиномеров представляется рассмотрение модели, когда ЭМАП излучает короткие по длительности ультразвуковые импульсы. Примем, что при тех же, что и в предыдущем примере, параметрах толщиномера и донной поверхности, возбуждающий акустическое поле ЭМАП формирует сигналы в виде пакета с заданной частотой заполнения, длительностью $\tau_И$ и периодом следования $T_{СЛ}$. Прием полезных сигналов осуществляется только во время прихода донных импульсов. Такой подход правомерен, поскольку в результате коррозионного повреждения толщина изделия может уменьшиться и не может увеличиться. Основные геометрические данные, необходимые для выполнения исследований, приведены на рис. 3.

Сформированное возбуждающим ЭМАП акустическое поле будет носить прерывистый характер, в виде следующих друг да другом пакетов толщиной $c\tau_И$, где c – скорость распространения ультразвуковых импульсов (постоянная величина для данного материала). Расстояние между пакетами будет составлять $cT_{СЛ}$. Условия формирования таких импульсов имеет вид:

$$\frac{c\tau_И}{cos\beta} << \alpha, \quad \frac{cT_{СЛ}}{cos\beta} > \alpha .$$

Импульс накладывается на донную поверхность постепенно, формируя отражающую поверхность в виде площадки прямоугольной формы:

$$a' = \frac{c\tau_И}{cos^2\beta}.$$

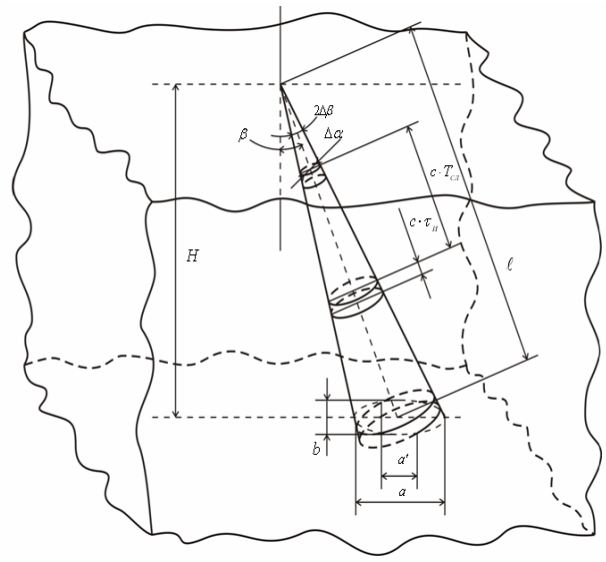


Рисунок 3 - Геометрическое построение для пояснения процесса отражения при короткоимпульсном возбуждении акустического поля

Облучаемая при этом площадка пропорциональна первой степени от толщины изделия, т.е.

$$S_{ПЛ} = a'b = \frac{c\tau_И\Delta\alpha}{cos^2\beta}H = CH,$$

где $C = \frac{c\tau_И\Delta\alpha}{cos^2\beta}$. Следовательно

$$W_{ПР} = \frac{AC}{H^3}cos^3\beta, \qquad (15)$$

т.е. типовой импульсный режим возбуждения акустического поля менее выгодный, чем непрерывный.

По аналогии с (11) можно показать, что эффективность толщинометрии определяется полной энергий возбуждаемого акустического импульса. Кроме того, длительность импульса следует устанавливать равную величине, обеспечивающей формирование полной площади эллипса на донной поверхности.

Предельный переход к случаю формирования акустического поля нормально поверхности ввода даст максимальную величину принятой мощности.

ВЫВОДЫ

Теоретически показано, что эффективности контроля толщины изделия определяется полной энергией возбуждаемого импульса.

Установлено, что повышать эффективность контроля толщины изделий при наклонном вводе акустического поля целесообразно за счет увеличения длительности зондирующих импульсов.

Литература

1. Патон Б. Є., Троїцький В. О., Посипайко Ю. М. Неруйнівний контроль в Україні // Інформ. бюл. Українського товариства неруйнівного контролю та технічної діагностики. –2003. –№ 2(18). – С. 5–9.

2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.

3. Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. III. Обратное и двойное ЭМАП в нормальном поляризующем поле. – Дефектоскопия, 2007, № 1. – С. 64–79.

4. Мужицкий В.Ф., Ремезов В.Б., Комаров В.А. К основам ЭМА толщинометрии с помощью накладных преобразователей. IV. Обратное и двойное ЭМАП в тангенциальном поляризующем поле. – Дефектоскопия, 2007, № 2. – С. 35–52.

5. Сучков Г.М. Возможности современных ЭМА толщиномеров // Дефектоскопия. - 2004. - №12. - С. 16-25

6. Сучков Г.М., Донченко А.В., Десятниченко О.В. Бесконтактный ультразвуковой измеритель толщины тонких материалов и изделий.– Зб. наукових праць ДонНТУ.– Донецьк: РВВ. – 2007. – № 13. – С. 208-212.

7. Гусев Е. А., Королев М. В., Карпельсон А. Е. и др. Приборы неразрушающего контроля толщины в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 144 с.

8. Жуков В.К., Ольшанский В.П. Электромагнитно – акустический преобразовательный модуль // Дефектоскопия. – 1985. – № 12. – С. 74–76.

9. Себко В. П., Сучков Г.М., Алексеев Е. А. Оптимизация параметров ЭМА толщиномеров для контроля тонкостенных изделий // Дефектоскопия. – 2002. – № 12. – С. 21–28.

10. Woodward P. M. Probability and Information Theory with Applications to Radar, 2`nd ed. – Oxford. Pergamon Press Ltd., 1953. – P. 730–747.

11. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.

12. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.

13. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1980. – 536 с.

14. Теоретические основы радиолокации: Учебник для вузов / Под ред. В.Е Дулевича. – М.: Сов. Радио, 1978. – 608 с.

15. Каринский С.С. Устройства обработки сигналов на ультразвуковых поверхностных волнах. – М.: Советское радио, 1975. – 176 с.

16. Сучков Г. М. Определение сечения рассеяния сдвиговых линейно поляризованных ультразвуковых колебаний с произвольной ориентацией вектора поляризации на длинном круговом цилиндрическом дефекте. – Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №2. – С. 3–9.

17. Сучков Г. М., Донченко А.В. Реальная чувствительность ЭМА приборов. – Дефектоскопия. – 2007 – № 6. – С. 43–50.

Поступила в редакцію 17.11.2008р.