

УДК 620.179.16

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УГЛОВЫМ ВВОДОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ

Тымчик Г. С., Подолян А. А.

*Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт",
г. Киев, Украина*

В статье рассмотрен анализ электромагнитно-акустического (ЭМА) преобразователя с управляемой угловым вводом акустической волн, исходя из параметров, влияющих на формирования акустической волны. Исследована возможность углового ввода ультразвуковой волны с помощью системы параллельно расположенных нитей-излучателей. Установлена зависимость угла ввода ультразвуковой волны от параметров среды контроля, расстояния между нитями-излучателями, сдвига фаз между гармоническими токовыми сигналами, подаваемыми на соседние излучатели, и частоты гармонического сигнала. С помощью математического моделирования исследовано влияние расстояния от нитей-излучателей до поверхности объекта контроля. Показано резкое снижение акустического давления, при увеличении расстояния от нитей-излучателей до поверхности объекта контроля. Показано, что изменение угла, между ЭМА преобразователем и поверхностью объекта контроля, приводит к значительному ухудшению возбуждения акустической волны на поверхности объекта контроля.

***Ключевые слова:** ЭМА, преобразователь, акустическое давление, неразрушающий контроль, угловой ввод, ультразвуковая волна.*

Введение

Среди исследований, связанных с созданием аппаратуры неразрушающего контроля, особое место занимают поиски бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвука в твердых телах [1]. Успехи в отмеченном направлении достигнуты за счет применения электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых колебаний.

В настоящее время в ЭМА дефектоскопах практически не применяется управляемый угловой ввод акустической волны, что существенно ограничивает области их использования. Вместе с тем, широко используются ЭМА дефектоскопы, имеющие фиксированный или дискретно переключаемый угол ввода акустической волны. Задача управляемого углового ввода акустической волны с помощью ЭМА преобразователей может быть решена только в результате совместного исследования излучения, формирования магнитного поля [2, 3] и формирования зондирующих импульсов [4]. Решение поставленной задачи исследования излучения позволит повысить эффективность ультразвуковой дефектоскопии по достоверности и скорости проведения работ.

Постановка задачи

Целью данной статьи является анализ формирования акустической волны с угловым вводом в ЭМА преобразователях систем неразрушающего контроля.

Анализ формирования акустических колебаний нитью

На расстоянии h (рис. 1) от упругого, однородного, изотропного и линейного электропроводящего полупространства 2 расположена нить с гармоническим током [5]:

$$I = I_0 \cdot \cos(\omega t) = I_0 \cdot \cos(2\pi f t),$$

где I_0 - амплитудное значение тока нити; ω - круговая частота; f - частота тока в нити.

Приняты следующие допущения [5]: нить жестко закреплена, не совершает механических колебаний, фаза и амплитуда тока в нити постоянна по всей её длине.

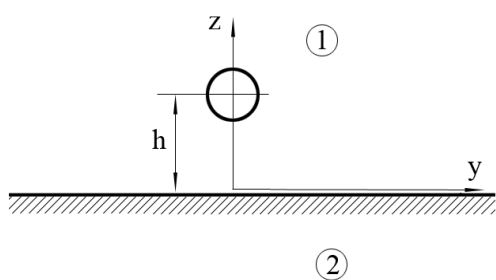


Рис. 1. Расположение нити-излучателя относительно объекта контроля

Нить натянута вдоль оси Ox по линии $y = 0, z = h$.

Полупространство 1 (воздух) характеризуется электропроводностью $\sigma_1 = 0$, магнитной проницаемостью $\mu_1 = \mu_0$ и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = \epsilon_0$.

Полупространство 2 (металл), имеет электропроводность $\sigma_2 = \sigma$, магнитную проницаемость $\mu_2 = \mu_0 \cdot \mu$.

Протекающий ток I_0 по нити индуцирует вихревые токи. Электродинамическое взаимодействие первичного и наведенного токов приводит к появлению давлений на поверхности полупространства 2.

Известно, что эффективность ЭМА преобразования повышается при наличии внешнего магнитного поля [2]. Это следует из теории ферромагнетизма и объясняется тем, что большой вклад в затухание УЗ колебаний в ферромагнетиках вносят потери на вихревые токи, возникающие при перемещении доменов. Внешнее магнитное поле приводит к упорядочению доменной структуры и уменьшает затухание ультразвука. В этом случае магнитное поле токов (B_{\approx}) аддитивно складывается с внешним постоянным магнитным полем ($B_{=}$), что записывается в виде [6]:

$$B_{\Sigma} = B_{\approx} + B_{=}.$$

Выражение, описывающее закон распределения давлений на поверхность полупространства 2, записывается в виде [6]:

$$p = -\mu_0 \cdot \mu \frac{I_0^2 \cdot h^2}{4 \cdot \pi \cdot (h^2 + y^2)^2} (1 + \cos 4 \cdot \pi \cdot f \cdot t) -$$

$$-\frac{I_0 \cdot h \cdot B_{\underline{}}}{\pi \cdot (h^2 + y^2)} \cos 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t,$$

где $B_{\underline{}}$ – индукция внешнего постоянного магнитного поля; h – расстояние от центра нити до поверхности объекта контроля; y – расстояние от проекции нити вдоль поверхности объекта контроля в перпендикулярном проекции направлении; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; μ – магнитная проницаемость материала объекта контроля.

Приведенное соотношение устанавливает связь между акустическим давлением на поверхность пространства с током нити и её расположением. Максимальное акустическое давление создается непосредственно под нитью. При удалении от этой линии и с увеличением расстояния h давление резко падает. С ростом величины тока давление растет в квадрате. Меняясь во времени, оно не меняет своего знака и изменяется от нуля до максимума дважды за период питающего тока.

Многочисленные экспериментальные исследования процессов возбуждения и приёма нормальных волн ЭМА методом, проведенные в Днепропетровском трубопрокатном заводе [7], позволили выявить оптимальное значение внешнего магнитного поля $B_{\underline{}} = 0,3$ Тл при контроле различных объектов (труб и листов) из ферромагнитной стали.

Результаты моделирования влияния различных факторов (величины тока наити I_0 , значения внешнего магнитного поля $B_{\underline{}}$, расстояния h от нити до поверхности объекта контроля) на создаваемое акустическое давление p представлены на графиках (рис. 2 - рис. 4.)

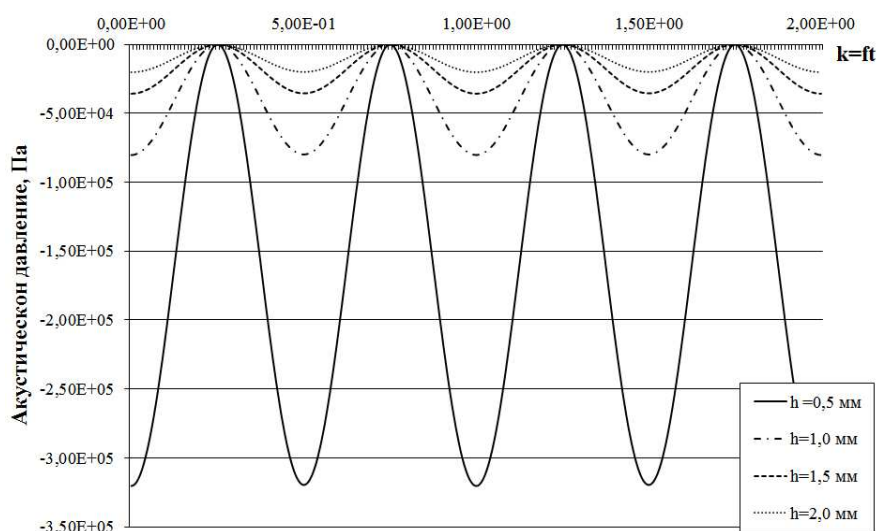


Рис. 2 Семейство зависимостей $p(t)$ при различных значениях расстояния h , ($y = 0$), $B_{\underline{}} = 0,3$ Тл, $I_0 = 2$ А, $f_i = 0,5$ МГц

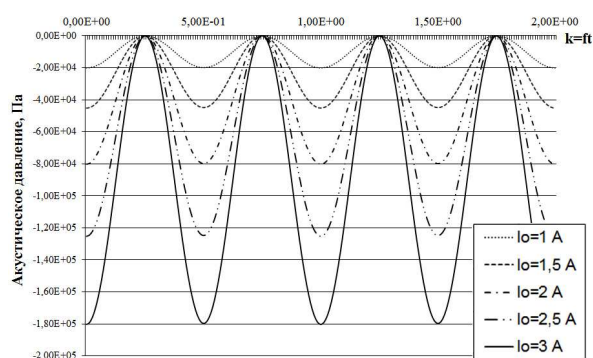


Рис. 3. Семейство зависимостей $p(t)$ при различных значениях амплитуды тока I_0 , ($y = 0$), $B_z = 0,3$ Тл, $h = 1$ мм, $f_i = 0,5$ МГц

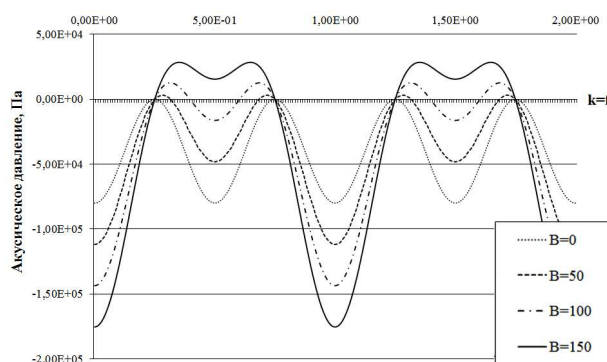


Рис. 4. Семейство зависимостей $p(t)$ при различных значениях индукции B_z , ($y = 0$), $I_0 = 2$ А, $h = 1$ мм, $f_i = 0,5$ МГц

Анализ формирования акустических колебаний системой дискретных элементарных

При ЭМА возбуждении [8] системой синфазных излучателей (рис. 5) шаг $\Delta y = l = \lambda$; при возбуждении систем противофазных излучателей

$$\Delta y = l = \lambda/2,$$

где $\lambda = \frac{c_c}{f}$ – длина нормальной волны в соот-

ветствующей рабочей точке; c_c – фазовая скорость УЗ волны; f – рабочая частота УЗ излучения.

От количества нитей-излучателей и их длины зависит размер результирующего пучка излучения.

Давление в каждой точке поверхности контролируемого пространства под решеткой будет создаваться каждой нитью-излучателем, с учетом расстояния от рассматриваемой точки до центра каждого излучателя, то есть [9]:

$$p_{\Sigma}(x, y) = \sum_{m=1}^n p_m(x, y),$$

где: $p_{\Sigma}(x, y)$ – суммарное давление, создаваемое решеткой на поверхности контролируемого пространства в точке с координатами (x, y) ; $p_m(x, y)$ – давление, создаваемое на поверхности контролируемого пространства в точке с координатами (x, y) излучателем m , где $m = 1, 2, \dots, n$.

Среднее давление на поверхность контролируемого объекта, ограниченную площадью решетки может быть определено в случае, если магнитный поток проходит равномерно по всему объему возбуждаемой поверхности.

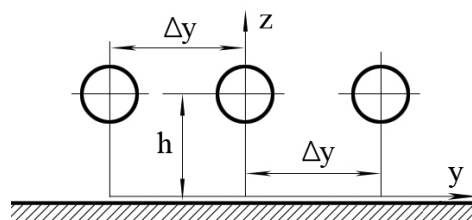


Рис. 5. Расположение нитей-излучателей

Для исследования процесса формирования решеткой синфазных нитей-излучателей акустических колебаний смоделировано влияние различных факторов на создаваемое суммарное акустическое давление p_{Σ} (рис. 6 – рис. 8). Результаты моделирования влияние угла между излучателем и поверхностью контроля, на создаваемое акустическое давление проиллюстрировано на рис. 9.

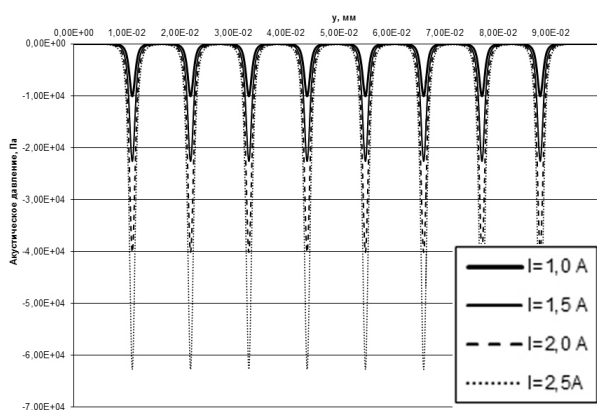


Рис. 6. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при различных значениях амплитуды тока I_0 , $B_{\perp} = 0,3$ Тл, $h = 1$ мм, $f_i = 0,5$ МГц

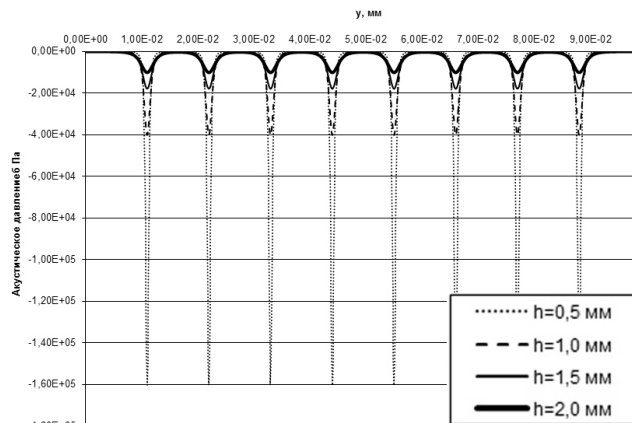


Рис. 7. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при различных значениях расстояния h , $B_{\perp} = 0,3$ Тл, $I_0 = 2$ А, $f_i = 0,5$ МГц

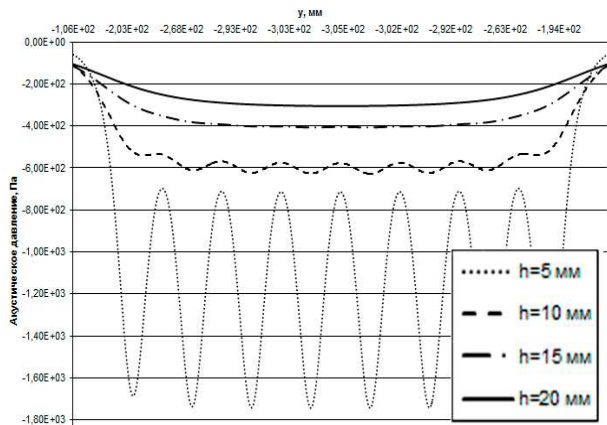


Рис. 8. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при больших значениях расстояния h , $B_{\perp} = 0,3$ Тл, $I_0 = 2$ А, $f_i = 0,5$ МГц

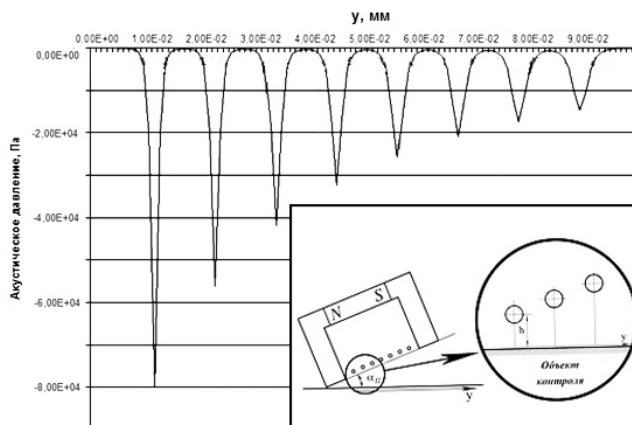


Рис. 9. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при перекосе датчик на $\alpha_{\Pi} = 0,5^{\circ}$ относительно поверхности объекта контроля, при $B_{\perp} = 0,3$ Тл, $h = 1$ мм, $f = 0,5$ МГц, $I_0 = 2$ А

На рис. 6 – рис. 8 показаны графики, иллюстрирующие формирование акустической волны решёткой, состоящей из нитей-излучателей. Наблюдается резкое снижение акустического давления, при увеличении значения амплитуды тока

I_0 и расстояния h от центра нити до поверхности объекта контроля (рис. 6 и рис. 7). При установке излучателя под углом к поверхности, форма распределения давлений резко изменяется (рис. 9).

Анализ формирования углового ввода ультразвуковой волны

В ряде работ [10, 11, 12] показана принципиальная возможность углового ввода ультразвуковых колебаний с помощью ЭМА преобразователя, получены основные формулы. Вместе с тем, вопрос практического применения плавного управления углом ввода ультразвуковой волны с использованием ЭМА преобразователей с излучателями в виде решетки проводников остаётся открытым.

Известно [11], что при падении плоской ультразвуковой волны по границе образуется вынужденная бегущая волна, скорость и направление которой зависит от угла падения. В этом случае, источником преломленных волн является колеблющаяся граница раздела, которая может быть эффективно возбуждена с помощью ЭМА преобразователя, построенного на основе решетки элементарных проводников-излучателей, расположенных в одной плоскости (рис. 10).

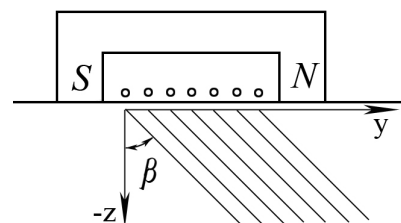


Рис. 10. Угловой ввод ультразвуковой волны в ЭМА преобразователе

Составляющая $\frac{\lambda}{l}$ определяет расхождение пучка излучения. В случае $l \gg \lambda$ пучок излучения будет малорасходящимся.

Скорость c_2 определяется частотой колебаний f и $Y_{2\pi}$ - расстоянием между ближайшими точками волнового фронта вдоль распространения бегущей волны, фаза колебаний которых отличается на 2π [11, 12].

Для возбуждения бегущей волны с заданными свойствами, необходимо, чтобы давление под каждым проводником-излучателем изменялось последовательно, со сдвигом фаз $\Delta\phi$ [12]:

$$\Delta\phi = \frac{4 \cdot \pi \cdot \Delta y \cdot f_l \cdot \sin \beta}{c_1},$$

где Δy – расстояние между соседними нитями-излучателями.

Заданный сдвиг фаз обеспечивается путем задержки в подаче гармонического сигнала на соседние нити-излучатели на некоторый промежуток времени Δt .

Рабочее выражение для расчета времени задержки подачи гармонического сигнала на соседние нити-излучатели для обеспечения заданного угла ввода ультразвуковой волны β может быть записано в виде [12]:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta y \cdot \sin \beta}{c_1}$$

При исследовании цифровой системы управления ЭМА преобразователем с угловым вводом ультразвуковой волны удобнее оперировать не временными интервалами, а частотой тактовых импульсов f_T и числом импульсов $N_{И}$.

Если принять, что полупериод изменения тока в нитях-излучателях ЭМА преобразователя составляет временной промежуток, включающий $N_{ИТ}$ – число тактовых импульсов, соответствующих временному промежутку Δt , тогда выражение для β может быть записано в виде [11, 12]:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c_1 \cdot N_{Иф}}{2 \cdot \Delta y \cdot f_T}\right)$$

Для исследования процесса формирования решеткой синфазных нитей-излучателей акустических колебаний с угловым вводом смоделировано влияние различных факторов (сдвига фаз $\Delta\phi$, величины тока нити I_0 , расстояния h от нити и решетки до поверхности объекта контроля, угла перекоса датчика $\alpha_{П}$ относительно поверхности объекта) на создаваемое суммарное акустическое давление p_{Σ} (рис. 11 и рис. 12).

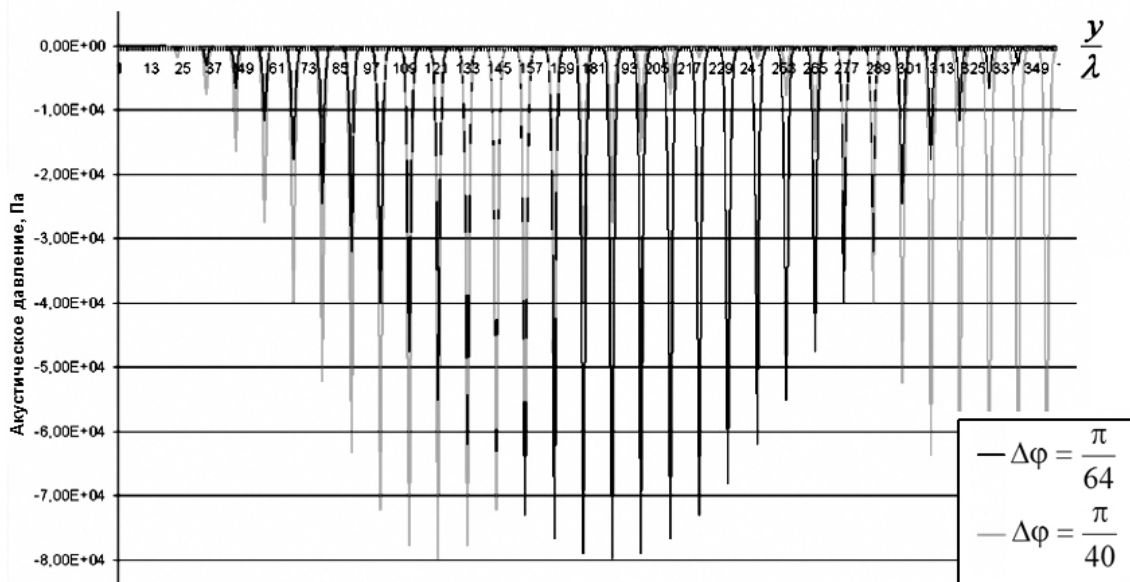


Рис. 11. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при разных значениях $\Delta\phi$ 32 нити, $B_{=} = 0,3$ Тл, $I_0 = 2$ А, $f_i = 0,5$ МГц, $k = f \cdot t = 1/4$

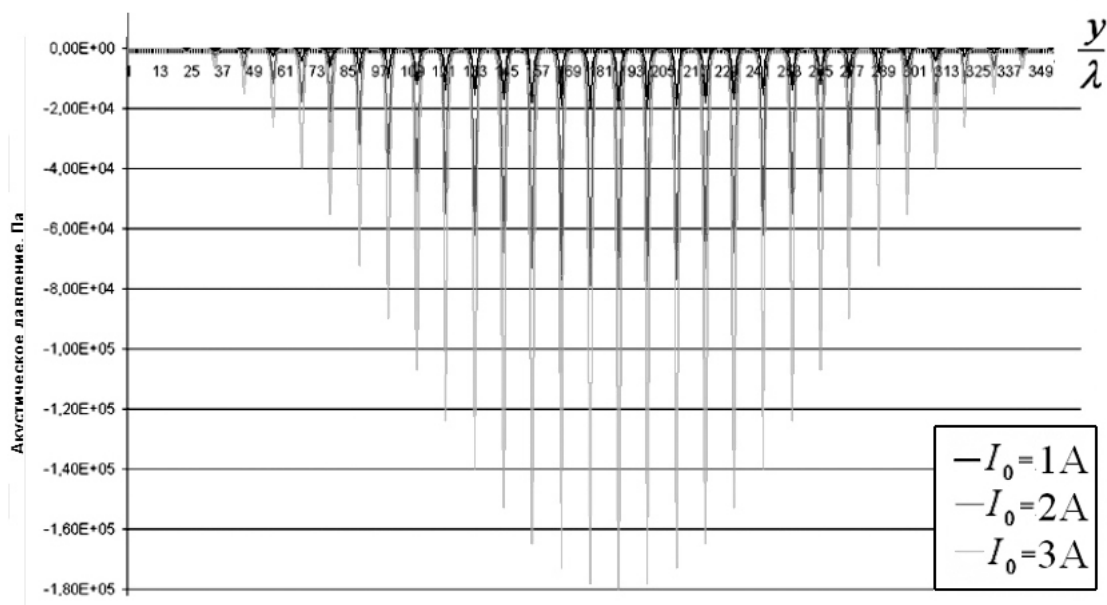


Рис. 12. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при значениях амплитуды тока I_0 32 нити, $B_{\perp} = 0,3$ Тл, $f_i = 0,5$ МГц, $k = f \cdot t = 1/4$, $\Delta\phi = \pi/64$

Практический интерес представляет исследование влияния неточности позиционирования решётки излучателей на эффективность возбуждения волны под углом к поверхности контролируемого объекта. Результаты моделирования влияния угла α_{Π} между излучателем и поверхностью контроля на формирование акустической волны с угловым вводом проиллюстрированы на рис. 13.

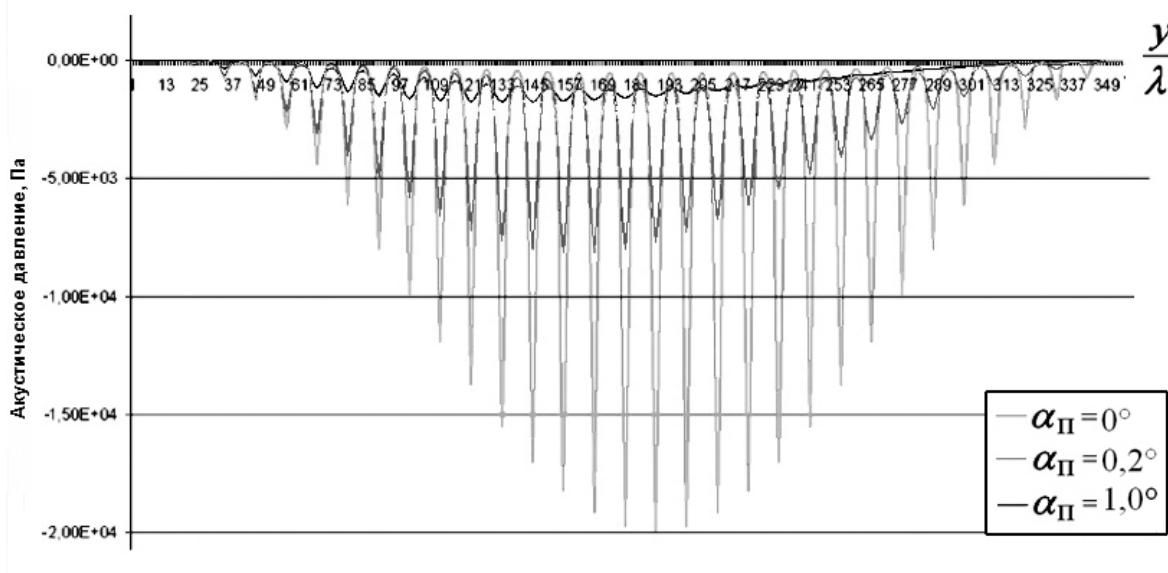


Рис. 13. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при перекосе датчика относительно поверхности объекта 32 нити, $B_{\perp} = 0,3$ Тл, $I_0 = 2$ А, $f_i = 0,5$ МГц, $k = f \cdot t = 1/4$, $\Delta\phi = \pi/64$

Рис. 11 – рис. 13 иллюстрируют распределение давлений под нитями-излучателями при фазированной подаче зондирующих импульсов и их изменение от сдвига фаз между нитями, а также от амплитуды тока.

Установка ЭМА датчика даже под небольшим углом, может привести к срыву акустической волны.

Выводы

Задача управляемого углового ввода акустической волны с помощью ЭМА преобразователей может быть решена только в результате совместного рассмотрения задач излучения, формирования магнитного поля и формирования зондирующих импульсов.

С помощью математического моделирования исследовано влияние различных факторов (величины тока, значения внешнего магнитного поля, расстояния от нити и решетки до поверхности объекта контроля). Определено оптимальное значение магнитной индукции внешнего постоянного магнитного поля для контроля ЭМА преобразователем. Рассмотрен расчет давлений, создаваемых нитью и решеткой на поверхности контролируемого объекта.

Показано, что без внешнего магнитного поля, акустическое давление не меняет своего знака и изменяется от нуля до максимума дважды за период питающего тока. Под воздействием сильного внешнего магнитного поля, акустическое давление под нитью возрастает, меняется форма зависимости его величины от времени, появляются положительные и отрицательные значения. Максимальное акустическое давление создается непосредственно под излучателем. При удалении от этой линии и с увеличением расстояния от нити до объекта контроля, давление резко падает. Акустическое давление также существенно зависит от амплитудного значения тока в нитях-излучателях.

Исследована возможность углового ввода ультразвуковой волны с помощью системы параллельно расположенных нитей-излучателей. Установлена зависимость угла ввода ультразвуковой волны, от параметров среды контроля, расстояния между нитями-излучателями, сдвига фаз между гармоническими токовыми сигналами, подаваемыми на соседние излучатели и частоты гармонического сигнала. Показано, что даже незначительный перекося ЭМА датчика приводит к значительному ухудшению возбуждения акустической волны под углом к поверхности объекта контроля.

Дальнейшие исследования предполагается проводить в направлении формирования углового ввода ультразвуковой волны ЭМА преобразователем с заданными характеристиками.

Литература

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др; Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Подолян А. А. Формирование магнитного поля с заданными характеристиками в ЭМА преобразователях систем неразрушающего контроля промышленного оборудования / А. А. Подолян // Методы и приборы контроля качества. – 2006. – Вип. 17. – С. 18 – 21.

3. Пат. на изобретение 2327152 Российская Федерация, МПК (2006) G01N 29/04. ЭМА преобразователь / Подолян А. А. - №2006116939; заявл. 18.05.2006; опубл. 20.06.2008, бюл. № 17.
4. Тымчик Г. С. Формирование импульсов специальной формы для электромагнитных акустических преобразователей / Г. С. Тымчик, А. А. Подолян // Вестник НТУУ «КПИ». Серия приборостроение. – 2013. – Вып. 45. – С. 64 – 69.
5. Яворский Б. М. Справочник по физике. Для инженеров и студентов вузов / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Наука, 1978. – 944 с .
6. Сазонов Ю. И. Исследование бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний: Ультразвуковые методы контроля. / Ю. И. Сазонов, Ю. М. Шкарлет // Дефектоскопия. – 1969. – Вып. 5. – С. 2 – 6.
7. Малинка А. В. Электромагнитно-акустический метод контроля ферромагнитных листов и труб / А. В. Малинка, И. А. Драпкин, Н. Т. Колomoец // Дефектоскопия. – 1972. – Вып. 4. – С. 44 – 48.
8. Глухов Н. А. Электромагнитно-акустические преобразователи для упругих волноводов / Н. А. Глухов, В. Т. Бобров, С. В. Веремченко и др. // Дефектоскопия. – 1972. – Вып. 4. – С. 39-45.
9. Цапенко В. К. Основы ультразвукового неруйнівного контролю: Підручник. / В. К. Цапенко, Ю. В. Куц. – К.: НТУУ «КПИ», 2010. – 448 с.
10. Буденков Г. А. Электромагнитно-акустические датчики для наклонного излучения ультразвуковых волн. / Г. А. Буденков, В. Н. Квятковский, Ю. В. Петров // Дефектоскопия. – 1974. – Вып. 1. – С. 38 – 44.
11. Малинка А. В. Излучение и приём ультразвуковых колебаний под заданным углом при электромагнитно-акустическом методе / А. В. Малинка // Дефектоскопия. – 1979. – Вып. 5. – С. 16 – 20.
12. Малинка А. В. Возбуждение и регистрация ультразвуковых колебаний ЕМА методом / А. В. Малинка, О. В. Неволин, Л. С. Пачковский // Неразрушающие физические методы и средства контроля. – Кишинев: ВНИИНК. – 1977. – д. 01/113. – С. 421 – 424.

*Надійшла до редакції
03 березня 2014 року*

© Тымчик Г. С., Подолян А. А., 2014