

Г.М. СУЧКОВ, проф. д-р техн. наук, НТУ «ХПИ»

А.А. КЕЛИН, аспирант, руководитель группы ХХП «Сертификационный центр АСУ»

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПРИЕМА ВОЛН РЕЛЕЯ

Приведено теоретическое обоснование построения электромагнитно-акустического преобразователя (ЭМАП) на основе преобразователей типа «зигзаг», который позволяет принимать ультразвуковые волны Рэлея в одном направлении. Сравнение диаграмм направленности преобразователя типа «зигзаг», возбуждаемого равномерно, и преобразователя возбуждаемого со смещением по времени показал преимущество однонаправленного ЭМАП.

The theoretical substantiation of construction of the Electro Magnetic Acoustic Transducer (EMAT) on the basis of transducers of type "zigzag" which allows accepting ultrasonic waves Relay in one direction. Comparison of diagram's of an orientation of the transducer of type the "zigzag" energize in regular intervals, and the transducer energize with displacement has shown advantage unidirectional EMAT.

Вступление. Одним из перспективных направлений ультразвукового контроля является дефектоскопия с помощью волн Релея (поверхностных волн) [1]. Чаще всего для приема и возбуждения волн Релея применяют ЭМАП [2], т.к. они не требуют использования контактной жидкости, которая существенно снижает чувствительность, а иногда и не позволяет проводить контроль [3]. Ранее разработанные ЭМА преобразователи имеют существенный недостаток. Они имеют двунаправленную диаграмму акустического поля, как при приеме, так и при возбуждении импульсов упругих волн. Это приводит к появлению когерентных помех и к возможности ошибочной оценки качества изделий. Исключить двунаправленность ЭМАП возможно за счет новых подходов к построению ЭМАП и новой технологии питания его высокочастотной катушки. Поэтому задача по теоретическому обоснованию однонаправленного ЭМАП для возбуждения и приема поверхностных волн является актуальной и своевременной.

Основная часть. В известной литературе [4] приведен основной подход расчета ЭМАП для приема волн Релея. Однако в этом источнике расчет ЭМА датчиков приведен для простых конструкций ЭМАП (одновитковая рамка, плоская многовитковая катушка, ЭМАП типа «зигзаг»). На практике же применяется комбинация из перечисленных выше преобразователей. К примеру в [5] приводится ЭМАП, конструкция которого приведена на рисунке 1.

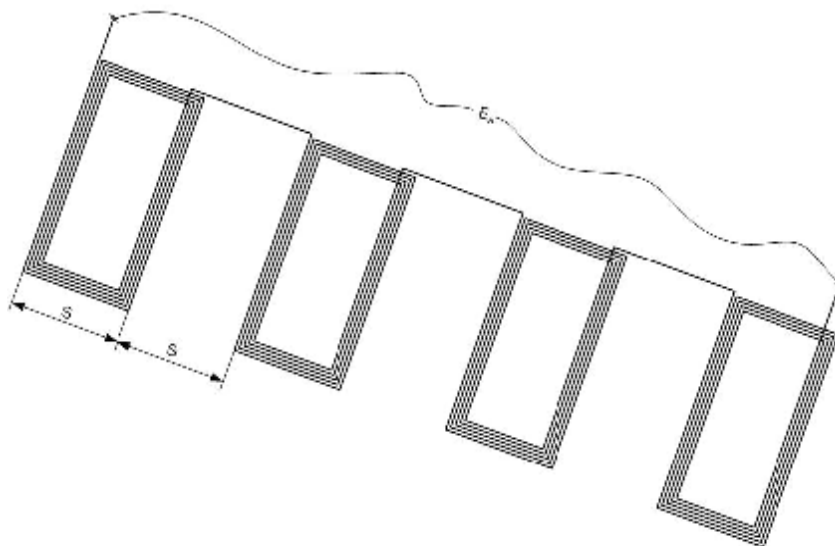


Рисунок 1 – ЭМАП для возбуждения и приема поверхностных волн с двунаправленным акустическим полем

Как видно (см. рис. 1) ЭМАП состоит из ряда катушек включенных последовательно. Другими словами взят ЭМАП типа «зигзаг», в котором вместо простых рамок (петель) включены многовитковые катушки. Однако, в известной научной и технической литературе [2-5] отсутствуют теоретические разработки, которые описывали бы ЭДС наводимую в таком преобразователе при приеме волн Рэлея.

Рассмотрим ЭДС, наводимую в проводнике в виде нити конечной длины [4]. Расположение нити над поверхностью металла и основные обозначения показаны на рисунке 2. (В данном случае рассматривается ЭДС наводимая в самой нити и не рассматривается ЭДС в проводниках, служащих для ее подключения к усилителю).

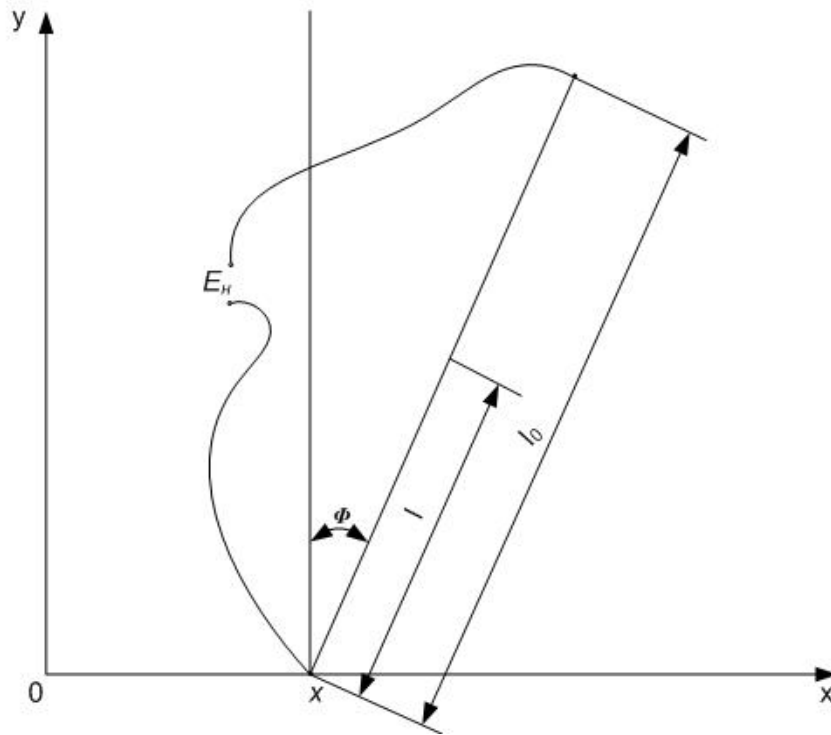


Рисунок 2 – Расчетная модель приемного ЭМАП с проводником в виде нити конечной длины

Как описано в [4], ЭДС наводимая в нити будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 E_n &= E(h) \cos \varphi \cdot e^{ikx} \int_0^{l_0} e^{ikl \sin \varphi} dl = \\
 &= E(h) \cdot e^{ik\left(x + \frac{l_0}{2} \sin \varphi\right)} \cdot \frac{2 \sin\left(\frac{kl_0}{2} \sin \varphi\right) \operatorname{ctg} \varphi}{k}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $E(h)$ – комплексная амплитуда y – компоненты вектора напряженности электрического поля в воздухе [5]; k – волновое число.

Далее рассмотрим ЭДС, наводимую в плоской катушке с N числом витков. Для этого нити конечной длины располагаем, как показано на рисунке 3, и находим ЭДС, возбуждаемую в каждой нити катушки. Результирующая ЭДС находится как сумма всех ЭДС каждой нити [6].

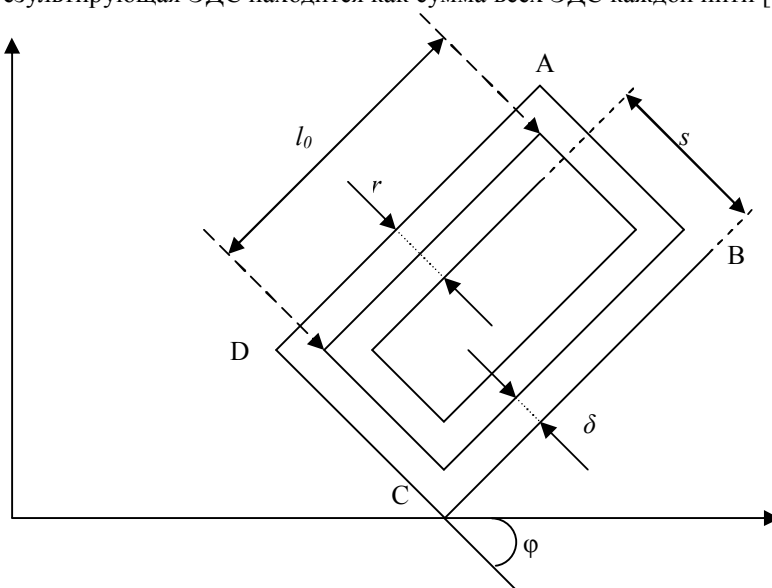


Рисунок 3 – Модель плоской катушки для расчета наводимой эдс при приеме волн Релея

$$E1(\varphi, N) = E(h) \cdot \left[\begin{aligned} & N \cdot (\cos(\varphi) - A(\varphi) \cdot \cos(\varphi) + A(\varphi) \cdot B(\varphi, N) \cdot \cos(\varphi) - B(\varphi, N) \cdot \cos(\varphi)) - \\ & - A(\varphi) \cdot C(\varphi)^{-1} \cdot \left[\frac{1 - (C(\varphi) \cdot D(\varphi))^{N+1}}{1 - C(\varphi) \cdot D(\varphi)} - 1 \right] \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + A(\varphi) \cdot B(\varphi, N) \cdot \left[\frac{1 - (C(\varphi)^{-1} \cdot D(\varphi))^{N+1}}{1 - C(\varphi)^{-1} \cdot D(\varphi)} - 1 \right] \cdot \operatorname{tg}(\varphi) - \\ & - B(\varphi) \cdot C(\varphi) \cdot D(\varphi) \cdot \left[\frac{1 - (C(\varphi)^{-1} \cdot D(\varphi)^{-1})^{N+1}}{1 - C(\varphi)^{-1} \cdot D(\varphi)^{-1}} - 1 \right] \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + C(\varphi) \cdot D(\varphi) \cdot \left[\frac{1 - (C(\varphi)^{-1} \cdot D(\varphi)^{-1})^{N+1}}{1 - C(\varphi)^{-1} \cdot D(\varphi)^{-1}} - 1 \right] \cdot \operatorname{tg}(\varphi) + \\ & + A(\varphi) \cdot C(\varphi)^{-1} \cdot C(\varphi)^N \cdot D(\varphi)^N \cdot \operatorname{tg}(\varphi) - A(\varphi) \cdot B(\varphi, N) \cdot C(\varphi)^{-N} \cdot D(\varphi)^N \cdot \operatorname{tg}(\varphi) \end{aligned} \right] \quad (2)$$

где

$$A(\varphi) = e^{-i \cdot k \cdot l_0 \cdot \sin(\varphi)}$$

$$B(\varphi, N) = e^{-i \cdot k \cdot (s+r) \cdot \cos(\varphi)}$$

$$C(\varphi) = e^{-i \cdot k \cdot \delta \cdot \cos(\varphi)}$$

$$D(\varphi) = e^{-i \cdot k \cdot \delta \cdot \sin(\varphi)}$$

δ – расстояние между витками; s – ширина катушки; r – ширина намотки.

Используя выражение (2) несложно найти ЭДС наводимую в M катушках соединенных последовательно на расстоянии S друг от друга.

$$E(\varphi, N, \Delta t, S, M) = E1(\varphi, N) \cdot \left[\frac{1 - \left[e^{-i \cdot k \cdot (s+r+S) \cdot \cos(\varphi)} \right]^{M+1}}{1 - \left[e^{-i \cdot k \cdot (s+r+S) \cdot \cos(\varphi)} \right]} - 1 \right] \quad (3)$$

Диаграмма направленности такого преобразователя (см. рис. 1) находится как отношение ЭДС наводимой в преобразователе в произвольном направлении к ЭДС наводимой в «главном» направлении (другими словами при $\varphi=0$).

$$DN = \frac{E(\varphi, N, M)}{E(0, N, M)} \quad (4)$$

На рисунке 4 приведена диаграмма направленности ЭМАП преобразователя типа «зигзаг» с четырьмя петлями и 10 витками в каждой петле.

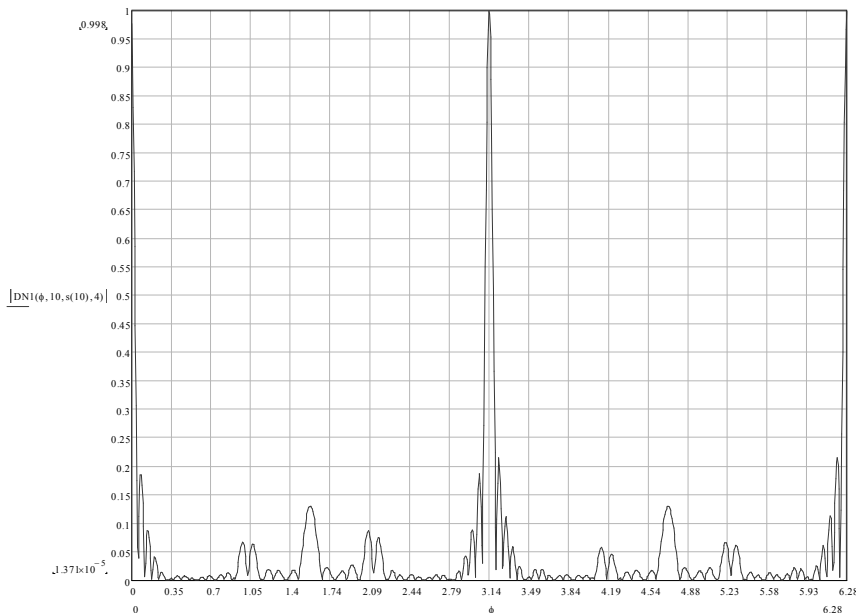


Рисунок 4 – Диаграмма направленности ЭМАП типа «зигзаг» при традиционном подходе

Как видно из рисунка 4 диаграмма направленности такого ЭМАП имеет два «основных» лепестка. Что на практике может приводить к перебраковке изделий.

Рассмотрим возможность улучшения диаграммы направленности такого типа ЭМАП.

Для этого поставим задачу получения диаграммы направленности с одним «главным» лепестком, либо уменьшением одного из «основных» лепестков до уровня не превышающему уровень боковых лепестков.

Для решения данной задачи возьмем за основу принцип построения фазированных антенных решеток (ФАР). Для этого будем полагать, что ЭДС наводится в каждой катушке преобразователя с некоторым смещением Δt . Тогда суммарная ЭДС наводимая в M катушках находящихся на расстоянии d друг от друга будет описывается следующим выражением:

$$E(\phi, N, \Delta t, d, M) = E1(\phi, N) \cdot e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \times \left[\frac{1 - \left[e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t} \cdot e^{-i \cdot k \cdot (s+r+d) \cdot \cos(\phi)} \right]^{M+1}}{1 - \left[e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t} \cdot e^{-i \cdot k \cdot (s+r+d) \cdot \cos(\phi)} \right]} - \left[e^{i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t} \cdot e^{-i \cdot k \cdot (s+r+d) \cdot \cos(\phi)} \right]^M \right] \quad (5)$$

Подставив (5) в (4) получим диаграмму направленности такого преобразователя. На рисунках 5-7 приведены диаграммы направленности преобразователя принимающего волны Рэлея с некоторым смещением.

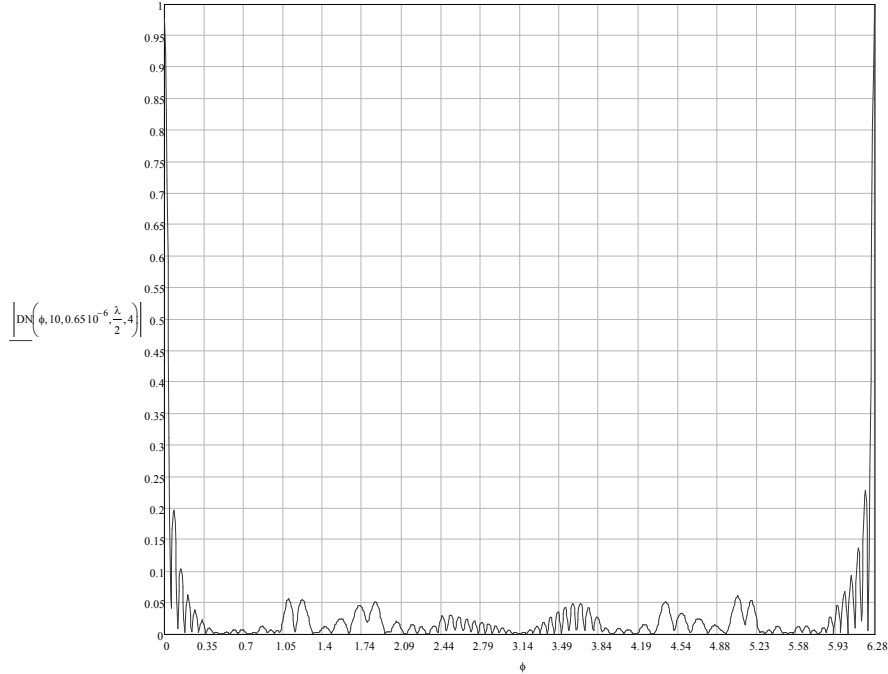


Рисунок 5 – Диаграмма направленности ЭМАП при приеме акустического поля с временным смещением равным 0,65 мкс

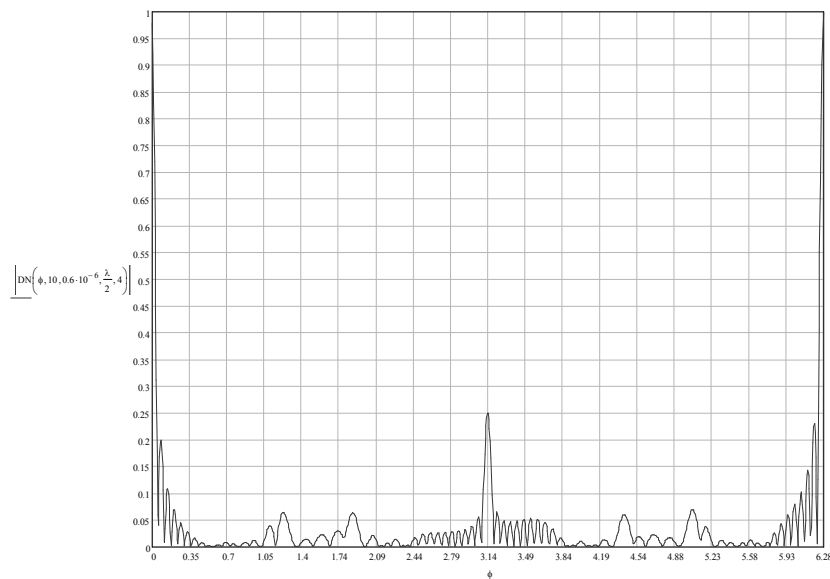


Рисунок 6 – Диаграмма направленности ЭМАП при приеме акустического поля с временным смещением равным 0,6 мкс

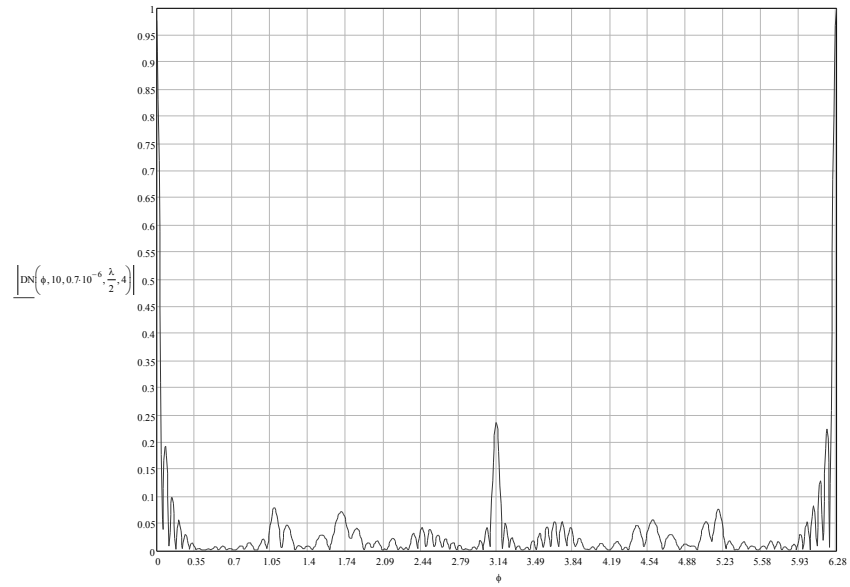


Рисунок 7 – Диаграмма направленности ЭМАП при приеме акустического поля с временным смещением равным 0,7 мкс

Как видно из приведенных графиков (см. рис. 5-7) при приеме со сдвижкой по времени сигнала один из «главных» лепестков уменьшается, а второй становится тоньше. В свое время боковые лепестки по углам 90 и 270 градусов также снижаются, что может положительно сказаться на четкости обнаружения местоположения дефекта.

Анализ выполненных теоретических исследований позволяет сделать следующие выводы:

Теоретически показана возможность уменьшения (a в некоторых случаях и снизить до нуля) одного из двух «основных» лепестков диаграммы направленности электромагнитно-акустического преобразователя для приема волн Релея. Для этого необходимо принимать поверхностные волны каждым рабочим участком ЭМАП со сдвижкой во времени.

При описанном способе приема поверхностных акустических волн «главный» лепесток диаграммы направленности ЭМА преобразователя становится остронаправленным, что позволит определять координаты обнаруженных поверхностных дефектов с большей точностью.

Использование нового подхода к приему акустических волн позволяет исключить влияние на результаты контроля когерентных акустических помех.

Список литературы: 1. Патон Б. С., 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. Сучков Г.М. Развитие теории и практики создания приборов для электромагнитно-акустического контроля металлоизделий. Докт. дис. – Харьков: Нац. техн. ун-т «Харьковский политехнический институт», 2005, – 521 с. 3. Сучков Г.М. Современные возможности ЭМА дефектоскопии. – Дефектоскопия, 2005, №12, с. 24–39. 4. Шубаев С.Н., Шкарлет Ю.М. Дефектоскопия, 1972, №5. – С. 63-72. 5. Шубаев С.Н., Шкарлет Ю.М. Дефектоскопия, 1972, №6 – С. 62-68. 6. Градштейн И.С., Рыжик И.М. таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений, М., Физматгиз, 1962.