



## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА НА СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ-ШУМ ПРИ ДВОЙНОМ ЭМАП

В. В. ГОРОДНИЧИЙ, Д. С. АСТАХОВ

Рассмотрено влияние длительности прямоугольного импульса на соотношение сигнал-шум при двойном ЭМА преобразовании. Рассмотрены случаи ЭМА преобразования в материалах с малыми электропроводностью и магнитной проницаемостью. Выполнены расчеты на математической модели двойного ЭМАП, которые показывают, что искажения прямоугольного радиоимпульса для продольных и поперечных волн незначительны.

Influence of square-wave pulse duration on the signal-to-noise ratio at double EMA transformation is considered. Cases of EMA transformation in materials with a low electric conductivity and magnetic permeability are analyzed. Calculations have been made, using a mathematical model of double EMAT, which show that distortions of a square-wave radio pulse are negligible for the longitudinal and transverse waves.

В связи с применением новых материалов все больший интерес проявляется к бесконтактным системам неразрушающего контроля (НК), в частности к электромагнитно-акустическим (ЭМА) системам УЗ. Большинство ЭМА систем позволяют контролировать изделия из материалов с высокой проводимостью и сильно выраженными ферромагнитными свойствами [2, 4, 5]. Анализируя эти источники, можно сделать вывод, что при контроле изделий со слабо выраженными электрическими и магнитными свойствами, например, некоторых сортов нержавеющей стали, эффективность ЭМА преобразования значительно уменьшается. Так, для нержавеющей сталей уровень принятого сигнала на порядок, а иногда на 2-3 порядка ниже сигнала, полученного при контроле углеродистых сталей. Для проведения контроля изделий из подобных материалов необходимо существенно повысить чувствительность системы контроля, например, путем применения сложных сигналов большой длительности [1, 3]. При этом необходимо применять оптимальный прием этих слабых сигналов.

Следует отметить, что электроакустический тракт ЭМА системы контроля искажает сигналы, что влияет на эффективность оптимального приема и, в свою очередь, на соотношение сигнал/шум. При существенных искажениях может возникнуть вопрос о целесообразности использования сложных сигналов для повышения чувствительности системы НК.

Учитывая, что сложные сигналы состоят из отдельных составляющих, наиболее часто представляющих собой прямоугольные радиоимпульсы [6], исследования искажений в первую очередь нужно провести для таких одиночных радиоимпульсов.

Для проведения теоретических исследований выберем математическую модель [2], которая наиболее просто описывает двойное ЭМА преобразование для сигнала произвольной формы.

Рассмотрим двойное ЭМАП одиночного прямоугольного радиоимпульса длительностью 2 мкс

с частотой заполнения  $f_0 = 2$  МГц. Материал, в котором происходит ЭМАП — немагнитная сталь 30X2H25 с электропроводностью  $\gamma = 7 \cdot 10^5$  Ом/м и магнитной проницаемостью  $\mu = 1$ . При этом диаметр провода 0,3 мм, число витков 10, число слоев 1, зазор катушка — изделие 5 мм.

Продольные акустические волны возникают в результате объемного магнитного и электродинамического взаимодействия [2]

$$P_M(j\omega) = \frac{1}{2\sqrt{\omega} \sqrt{2\pi\mu\gamma}} \left(1 - \frac{1}{\mu}\right) \times [\mu_0 n^2 F\{i^2(t)\}K_1 + 2B_0 n F\{i(t)\}K_2], \quad (1)$$

$$P_E(j\omega) = -\frac{\sqrt{\omega}}{16} \frac{\sqrt{2\gamma}}{\mu} n K_3 F\{i(t)\} \left[ B_0 K_4 + \frac{\mu_0}{z} n K_3 F\{i(t)\} \right], \quad (2)$$

где  $P_M(j\omega)$  — спектральная плотность давления акустической волны, вызванной объемным магнитным взаимодействием;  $\omega$  — круговая частота;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $z$  — зазор между передающей (приемной) катушкой и изделием;  $n$  — эффективное число витков катушки;  $F\{i^2(t)\}$  — энергетическая спектральная плотность возбуждающего тока;  $F\{i(t)\}$  — спектральная плотность возбуждающего тока;  $F\{x\}$  — оператор преобразования Фурье;  $K_x$  — коэффициенты, зависящие от размеров передающей (приемной) катушки и расстояния между катушкой и изделием;  $B_0$  — индукция подмагничивающего поля;  $P_E(j\omega)$  — спектральная плотность давления акустической волны, вызванной электродинамическим взаимодействием.

Суммарная спектральная плотность будет

$$P_S(j\omega) = P_M(j\omega) + P_E(j\omega). \quad (3)$$

Подставив в формулы (1) и (2) выражение для спектральной плотности и энергетической спектральной плотности прямоугольного радиоимпульса и выполнив обратное преобразование Фурье от  $P_S(j\omega)$ , получим комплексный сигнал  $U_2(t)$ , который наводится в приемной катушке.



Преобразование Фурье достаточно просто реализовать с помощью численных методов. В результате были вычислены спектральные плотности давления акустической волны  $P_M(j\omega)$ ,  $P_E(j\omega)$  и  $P_S(j\omega)$ , а также огибающая сигнала  $|\dot{U}_2(t)|$  и сам сигнал  $\text{Re}\{\dot{U}_2(t)\}$ .

Поперечные волны возникают за счет электромагнитного воздействия. Спектральная плотность давления поперечной волны определяется так [2]:

$$P_{nn}(j\omega) = -j\sqrt{\omega} \frac{\mu_0 n K_3 \sqrt{2\gamma}}{16\sqrt{\mu}} F\{i(t)\} \times \left[ B_0 K_7 + \frac{\mu_0}{2} n K_2 F\{i(t)\} \right]. \quad (4)$$

Найдем спектральную плотность ЭДС, наведенную в приемной катушке [2]:

$$U(j\omega) = n S_{\text{эф}} B_0 K_2 \frac{1}{z_B} P_{nn}(j\omega), \quad (5)$$

где  $z_B$  — волновое сопротивление материала для поперечной волны;  $S_{\text{эф}}$  — эффективная площадь катушки.

С помощью численных методов были получены значения  $P_{nn}(j\omega)$ ,  $U(j\omega)$  и  $\text{Re}\{U(j\omega)\}$ , а также проведена оценка отношения сигнал-шум импульса при его искажении после двойного ЭМАП.

Оценка влияния искажений на процесс оптимальной фильтрации после ЭМАП проводилась по изменению соотношения сигнал-шум. Так, расчеты по приведенным выше выражениям показывают,

что соотношение сигнал-шум уменьшается приблизительно на 13 % для продольных волн и на 10 % для поперечных волн.

## Вывод

Расчеты на математической модели двойного ЭМАП показывают, что искажения прямоугольного радиоимпульса для продольных и поперечных волн незначительны, что в свою очередь доказывает предположение о возможности использования сложных сигналов для ЭМА систем контроля с целью повышения их чувствительности.

1. *Городничий В. В.* Системы ультразвукового контроля с большим ослаблением сигнала. — Днепропетровск: Навчальна книга, 2000 // Сб. наук. статей «Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки». — С. 61–66.
2. *Городничий В. В., Серьга М. А., Астахов Д. С.* Упрощенные выражения для расчета электромагнитно-акустического преобразования // Техн. диагностика и неразруш. контроль. — 2004. — № 1. — С. 38–40.
3. *Городничий О. В.* Применение импульсных сигналов большой длительности в ультразвуковых системах контроля с воздушной акустической связью. — Днепропетровск: Навчальна книга, 2000 // Сб. наук. статей «Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки». — С. 67–70.
4. *Ермолов И. Н.* Теория и практика ультразвукового контроля. — М.: Машиностроение, 1981. — 240 с.
5. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий / В 2-х кн. Кн. 2 // Под. ред. В. В. Клюева.* — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1986. — 488 с.
6. *Варакис Л. Е.* Теория сложных сигналов. — М.: Сов. радио, 1970. — 376 с.

Физ.-техн. ин-т Днепропетровского нац. ун-та

Поступила в редакцию  
01.11.04

## Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе ежегодных научно-практических конференций, семинаров, круглых столов, выставок, организуемых Украинским информационным Центром «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ».

### Двадцать Пятая Юбилейная ежегодная международная конференция и блиц-выставка «КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ»

Научное руководство: Министерство промышленной политики Украины, АНТК «Антонов», ГКБ «Южное», ЗМКБ «Прогресс», ОАО НПО «Композит» при участии: Института механики металлополимерных систем НАН Беларуси, ФГУП ОНПП «Технология», ИХВС НАН Украины, ГК НПЦ им. Хруничева, ЦГУП НПО им. Лавочкина, ОАО «УкрНИИТМ», ОАО «УкрНИИАТ», УНИКТИ «ДИНТЭМ».

Место и время проведения: г. Ялта, начало июня 2005 г., оргвзнос из расчета 250 у. е. (с питанием, проживанием, участием в выставке).

### Тринадцатая ежегодная международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ»

Научное руководство: Украинское и Российское общества неразрушающего контроля и технической диагностики, Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики, Днепропетровский национальный университет, НПП «Машиностроение»

Место и время проведения: г. Ялта, начало октября 2005 г., оргвзнос из расчета 250 у. е. (с питанием, проживанием, без участия в выставке).

Оргкомитет конференций: тел.: (+38 044) 573-30-40  
E-mail: office@conference.kiev.ua, glavackaya@softhome.net, www.conference.kiev.ua