

which is confirmed by the coincidence of the frequency and characteristics of the amplitude. The information generated by a computer model of the frequency response transducers match the frequency response, and based on mathematical models. It was established that the non-linearity of frequency and amplitude-frequency error transducers depends on the angle between the polarization vector and the vector of the electric field of the output voltage. For drives on the basis of the modified active filter circuits treble with an increase in the angle between the polarization vector and the vector of the electric field of the output voltage from 0 to 82° resonant peak of the converter and the amplitude-frequency error is reduced.

**Keywords:** piezoelectric transducer, bimorph piezoelement, domain-dissipative transducer, computer simulation, the transmission ratio frequency, frequency response.

*Надійшла до редакції  
24 жовтня 2016 року*

*Рецензовано  
07 листопада 2016 року*

© Трембовецкая Р. В., Тычков В. В., 2016

УДК 620.179.14

## КОНТРОЛЬ ТОВЩИНИ ЛАКОФАРБОВИХ ПОКРИТТІВ, НАНЕСЕНИХ НА МЕТАЛЕВУ ОСНОВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИМ МЕТОДОМ

*Подольян О. О., Андрієнко О. І., Атаманенко В. В., Шалоумов Є. В.*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна  
E-mail: Podoljan@i.ua*

*У даній статті розглядається можливість визначення товщини лакофарбових покриттів об'єктів використовуючи електромагнітно-акустичний (ЕМА) метод. За допомогою математичного моделювання досліджено вплив товщини лакофарбового покриття, нанесеного на металеву основу, на акустичні параметри ЕМА перетворювача. Експериментально отримані залежності, що показують вплив товщини лакофарбового покриття на створюваний акустичний тиск. Максимальний акустичний тиск створюється при відсутності лакофарбового покриття. Зі збільшенням товщини покриття тиск різко падає. Показано добру збіжність між отриманими теоретичними та експериментальними результатами.*

**Ключові слова:** ЕМА, перетворювач, лакофарбове покриття, товщина, акустичний тиск, неруйнівний контроль.

### **Вступ**

Серед досліджень, пов'язаних зі створенням апаратури неруйнівного контролю, особливе місце займають пошуки безконтактних методів збудження і реєстрації ультразвуку в твердих тілах [1]. Успіхи в зазначеному напрямку досягнуто за рахунок застосування електромагнітно-акустичного (ЕМА) методу збудження і прийому ультразвукових коливань.

В даний час ЕМА метод не застосовується для контролю товщини лакофарбових покриттів нанесених на металеву основу, що істотно обмежує області його використання. Разом з тим, широко використовуються ЕМА дефектоскопи, для контролю якості самої основи. Задача контролю товщини лакофарбового покриття за допомогою ЕМА перетворювачів може бути вирішена тільки в

результаті спільного дослідження випромінювання, формування магнітного поля [2, 3] і формування зондувальних імпульсів [4]. Рішення поставленої задачі дослідження випромінювання дозволить проводити комплексний контроль виробу спільно з нанесеним на нього покриттям, що підвищить ефективність ультразвукової дефектоскопії по достовірності і швидкості проведення робіт.

### **Постановка задачі**

Метою роботи є аналіз залежності між товщиною лакофарбових покриттів металевих виробів акустичним тиском, створюваним в ньому під час контролю з використанням ЕМА перетворювачів.

**Аналіз залежності параметрів акустичної хвилі від товщини лакофарбового покриття від**

Базуючись на дослідженнях низки авторів [5,6,11], в нашому випадку на поверхні лакофарбового покриття, нанесеного на металеву основу, розташовано дріт з гармонічним струмом [5, 11]:

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

де  $I_0$  – амплітудне значення струму,  $\omega$  – кутова частота,  $f$  – частота струму в дроті.

Зазвичай, для підвищення якості ЕМА перетворення використовують зовнішні магнітні поля. В теорії феромагнетизму існує пояснення, згідно якому, найбільший вплив на затухання ультразвукових коливань в об'єкті мають вихрові струми, які виникають внаслідок зміщення доменів. Зовнішнє магнітне поле зменшує затухання ультразвуку за рахунок впорядкування доменної структури. Таким чином, сумарне магнітне поле можна виразити наступним чином [6, 11]:

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

Таким чином, можна записати рівняння розподілу акустичного тиску на поверхню [6, 11]:

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

де  $B_{\approx}$  – індукція зовнішнього постійного магнітного поля,  $h$  – величина лакофарбового покриття,  $y$  – відстань від проекції дроту вздовж поверхні об'єкту контролю,  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала,  $\mu$  – магнітна проникність контролюваного матеріалу.

З наведеного вище виразу видно, що існує обернена залежність між розміром лакофарбового покриття  $h$  та акустичним тиском. Тобто при збільшенні  $h$  – акустичний тиск буде зменшуватись.

В результаті моделювання було встановлено залежність між товщиною лакофарбового покриття та акустичним тиском, що відображено на наступному графіку рис. 1.

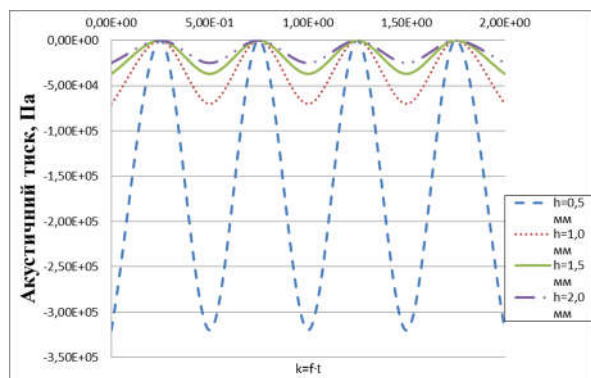


Рис. 1. Графік залежності акустичного тиску від товщини лакофарбового покриття при формуванні сигналу одним випромінювачем.

При  $y=0$ ,  $B_{\approx}=0,3$  Тл,  $I_0=2$  А,  $f_i=0,5$  МГц

На рис. 1 показаний графік, що ілюструє залежності формування акустичної хвилі одним випромінювачем. Спостерігається різке зниження акустичного тиску, при збільшенні значення товщини покриття  $h$ .

### Аналіз формування акустичних коливань системою синфазних випромінювачів

Процес формування акустичних коливань в тілі об'єкту контролю детально досліджений рядом авторів [7, 8, 9, 10, 11]. Базуючись на них, для дослідження процесу формування решіткою синфазних дрітків-випромінювачів акустичних коливань змодельовано вплив товщини лакофарбового покриття, при його однаковій товщині по всій поверхні металевої основи, на яку воно нанесене, на створюваний сумарний акустичний тиск (рис. 2).

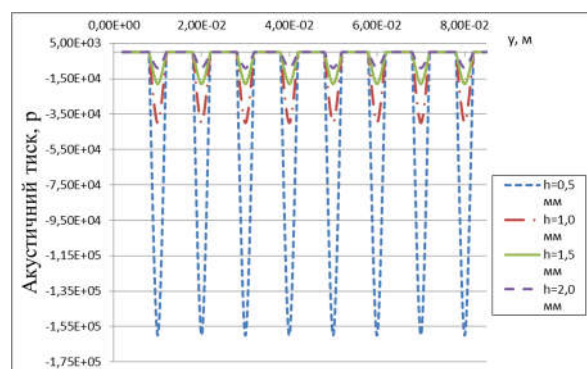


Рис. 2. Графік залежності сумарного акустичного тиску від товщини лакофарбового покриття при формуванні сигналу сімейством випромінювачів.

При  $B_{\approx}=0,3$  Тл,  $I_0=2$  А,  $f_i=0,5$  МГц

На рис. 2 показаний графік, який ілюструє формування акустичної хвилі решіткою, що складається з дрітків-випромінювачів. Аналогічно з графіком, представленим на рис. 1, спостерігається різке зниження акустичного тиску, при збільшенні значення товщини покриття  $h$ .

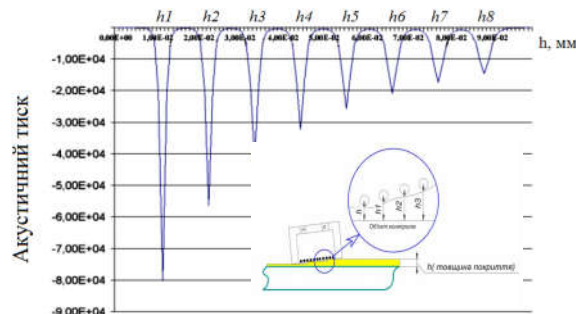


Рис. 3. Залежність сумарного акустичного тиску при різних товщинах лакофарбового покриття. При  $B_{\approx}=0,3$  Тл,  $I_0=2$  А,  $f_i=0,5$  МГц

Також було проведено дослідження процесу впливу формування решіткою синфазних дровів-випромінювачів акустичних коливань, змодельовано вплив при нерівномірному розподілі товщини лакофарбового покриття по поверхні металевої основи на створюваний сумарний акустичний тиск.

При нерівномірному нанесенні лакофарбового покриття, форма розподілу тисків різко змінюється (рис. 3).

### Експериментальні дослідження

Для підтвердження теоретичних досліджень, було проведено ряд експериментів. Під час експерименту використовувався універсальний дефектоскоп УД4-Т і та ЕМА-перетворювача Е411-5-К12. Був проведений аналіз залежності акустичного тиску та товщиною змодельованого лакофарбового покриття нанесеного на металеву основу, шляхом пошарового нанесення покриття та подальшого вимірювання акустичного сигналу у зоні його нанесення.

В якості імітації покриття використовувалися аркуші паперу (щільність  $80\text{г/м}^2$ , товщина 104 мікрона, або 0,104мм), який має наближенні діелектричні та магнітні характеристики з лакофарбовими матеріалами.

Товщина покриття визначалась кількістю шарів паперу, та не перевищувала 1,3 мм. При подальшому збільшенні товщини, прийнятий сигнал зривається. В якості металевої основи брали два бруски-еталони товщиною 59 і 29 мм.

Результати експериментальних результатів відображені на графіках рис. 4 та рис. 5.

Розбіжність між теоретичними і практичними даними не перевищує 5%, що показує гарну збіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

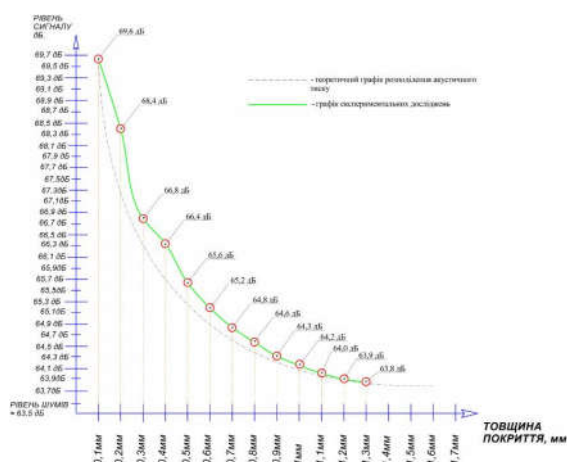


Рис. 4. Графік експериментальних досліджень залежності акустичного тиску від товщини лакофарбового покриття, при товщині металевої основи, на яку воно нанесене 59 мм.

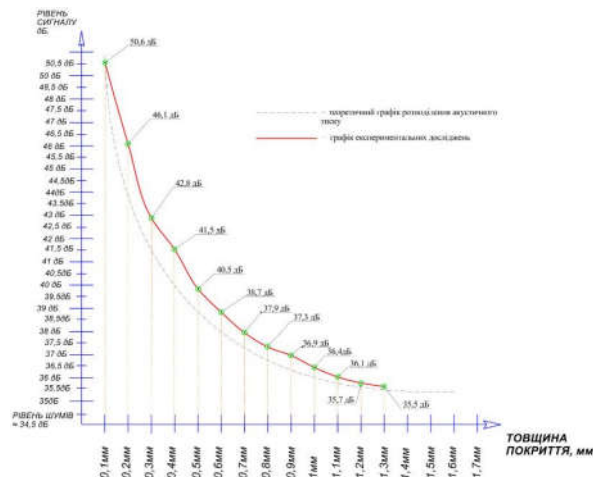


Рис. 5. Графік експериментальних досліджень залежності акустичного тиску від товщини лакофарбового покриття, при товщині металевої основи, на яку воно нанесене 29 мм

### Висновки

За допомогою математичного моделювання досліджено вплив товщини лакофарбового покриття нанесеного на металеву основу на акустичні параметри ЕМА перетворювача.

Експериментально отримані залежності, що показують вплив товщини лакофарбового покриття на створюваний акустичний тиск. Максимальний акустичний тиск створюється при відсутності лакофарбового покриття. Зі збільшенням товщини покриття тиск різко падає.

Показана хороша збіжність результатів теоретичних і експериментальних досліджень, похибка апроксимації експериментально отриманих даних в основному не перевищує 5%.

В основу досліджень покладений широко апробований підхід до аналізу процесу формування акустичної хвилі ЕМА перетворювачем. Вірогідність отриманих результатів підтверджується коректним використанням математичного апарату й доброю збіжністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Подальші дослідження планується проводити в напрямку дослідження впливу акустичних параметрів електромагнітно-акустичного перетворювача на якість лакофарбового покриття металевих виробів.

### Література

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. – Вып. 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. Коломоец // 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. Анализ электромагнитно-акустического преобразователя с угловым вводом возбуждения ультразвуковой волны / Г. С. Тымчик, А. А. Подолян // Вестник НТУУ «КПИ» серия приборостроение. – 2014 – Вып. 47. – С. 85 – 94.

УДК 620.179.14

**А. А. Подолян, А. И. Андриенко, В. В. Атаманенко, Е. В. Шалоумов**

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», г. Киев, Украина*

### КОНТРОЛЬ ТОЛЩИНЫ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ НА МЕТАЛЛИЧЕСКУЮ ОСНОВУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В статье рассматривается возможность определения толщины лакокрасочных покрытий объектов, используя электромагнитно-акустический (ЭМА) метод. С помощью математического моделирования исследовано влияние толщины лакокрасочного покрытия, нанесенного на металлическую основу на акустические параметры ЭМА преобразователя. Экспериментально получены зависимости, показывающие влияние толщины лакокрасочного покрытия на создаваемое акустическое давление. Максимальное акустическое давление создается при отсутствии лакокрасочного покрытия. С увеличением толщины покрытия давление резко падает. Показана хорошая сходимость между полученными теоретическими и экспериментальными результатами.

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

**O. O. Podolian, O. I. Andriyenko V. V. Atamanenko, E. V. Shaloumov**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

### CONTROL OF THICKNESS OF METAL FRAME LACQUER COATING BY ELECTROMAGNETIC-ACOUSTIC METHOD

The article describes possibility of determination of thickness of lacquer coating based on electromagnetic-acoustic (EMA) method. Using mathematical modeling was analyzed influence of thickness of metal frame lacquer coating on acoustic parameters of EMA transducer. Experimental data show convergence between thickness of lacquer coating and acoustical pressure. Maximum acoustic pressure is a result of absence of coating. Increasing of coating thickness leads to the decreasing of pressure. Experimental data demonstrates good convergence between theoretical and experimental results.

**Keywords:** EMA, converter, acoustic pressure, nondestructive testing, ultrasonic wave.

*Надійшла до редакції  
09 червня 2016 року*

*Рецензовано  
23 червня 2016 року*

© Подолян О. О., Андриенко О. И., Атаманенко В. В., Шалоумов Е. В., 2016