

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ УЗГОДЖУЮЧОГО ШАРУ П'ЄЗОПЕРЕТВОРЮВАЧА
ТА РОЗРАХУНОК ВТРАТ ЕНЕРГІЇ АКУСТИЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРИ
БЕЗКОНТАКТНОМУ СПОСОБІ ВИМІРЮВАННЯ ТОВЩИНИ**

© Рибіцький І.В., 2007

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Проведено аналіз проблем, які виникають при розробці безконтактних ультразвукових перетворювачів. Розроблено математичну модель узгоджуючого шару ультразвукового перетворювача. Проведено порівняльний розрахунок втрат енергії акустичних коливань для двох перетворювачів з різними узгоджуючими шарами при безконтактному способі вимірювання товщини сталевих пластин. Здійснено вибір матеріалу узгоджуючого шару з оптимальним значенням акустичного імпедансу

Технологія ультразвукових досліджень з використанням рідин для акустичного контакту є традиційною в неруйнівному контролі. Проте, як було зазначено в роботі [1], необхідність забезпечення акустичного контакту з використанням рідин унеможливує застосування такої технології контролю на металоконструкціях, які мають складну геометрію та на тих об'єктах, де не допустимий контакт перетворювача з контрольованим об'єктом.

Використання безконтактних методів передачі акустичних коливань в поєднанні з традиційними п'єзоматеріалами дає можливість вирішити дані проблеми та не накладатиме додаткові вимоги до генераторно-приймальних трактів ультразвукової апаратури. Основними проблемами передачі ультразвукової енергії через повітря в матеріал є значне неспівпадання акустичного імпедансу п'єзопластини, повітря та досліджуваного матеріалу, велика різниця швидкостей звукових хвиль в повітрі і контрольованому матеріалі та високе значення коефіцієнта затухання ультразвукових хвиль в повітрі [2], що призводить до зменшення величини акустичної енергії на виході, чутливості та співвідношення сигнал-шум.

В техніці ультразвуку можливі наступні способи узгодження імпедансів [3,4]: за допомогою проміжної узгоджуючої ланки (чи декількох), акустичні властивості якої постійні по всій довжині; за допомогою проміжної узгоджуючої ланки визначеної довжини з плавним (за певним законом) змінними характеристиками.

Метою даної роботи є розроблення математичної моделі процесу поширення ультразвукових коливань в узгоджуючому шарі п'єзоперетворювача, проведення розрахунку втрат енергії акустичних коливань при безконтактному

способі вимірювання товщини та вибір матеріалу узгоджуючого шару.

В загальному випадку п'єзоелектричний перетворювач можна представити у вигляді багатшарової структури, яка складається з довільним чином послідовно розміщених п'єзоелектричних активних і пасивних плоскопаралельних шарів [4]. Величина ультразвукової енергії, що випромінюється п'єзоперетворювачем через повітря, в основному залежатиме від акустичних імпедансів п'єзопластини, узгоджуючого шару (декількох шарів) та середовища, в яке випромінюються пружні коливання. Правильний вибір геометричних та фізичних характеристик узгоджуючого шару дозволить зменшити втрати енергії акустичних коливань на границі розподілу середовищ п'єзоматеріал-повітря та отримати максимальне значення акустичної енергії на виході перетворювача.

Для побудови математичної моделі процесу поширення акустичних коливань в системі п'єзопластина, узгоджуючий шар, середовище навантаження (для безконтактних п'єзоперетворювачів – повітря) розіб'ємо її на окремі ділянки (шари) з однорідними акустичними властивостями та запишемо рівняння поширення акустичних коливань в цих середовищах та системи рівнянь на межах ділянок.

Для плоскої хвилі потенціал коливальної швидкості частинок середовища залежить від координати x та часу t . В такому випадку рівняння для плоскої хвилі має вигляд [4]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де φ - потенціал коливальної швидкості частинок середовища, c_0 - швидкість поширення хвилі.

При умові, що початковий зсув фази рівний нулю та напрямком поширення хвилі є додатній, розв'язок рівняння (1) буде таким [5]:

$$\begin{aligned}\varphi(x, t) &= \varphi_{\max} e^{i2\pi\left(t - \frac{fx}{c_0}\right)} = \\ &= \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \varphi_{\max} \sin(\omega t - kx),\end{aligned}\quad (2)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова (циклічна) частота, $k = 2\pi f / c_0 = 2\pi / \lambda$ - хвильове число, λ - довжина хвилі в матеріалі.

При проходженні хвилі через границю розподілу двох твердих тіл виникають по дві відбитих і заломлених хвиль (повздовжні і поперечні). Якщо одне із середовищ є рідиною чи газом, поперечні хвилі в ньому відсутні і тоді загальна кількість хвиль зменшується [6,7]. Тому на далі поперечні хвилі брати до уваги не будемо.

Запишемо рівняння взаємодії хвилі (ультразвукових коливань) з границею розподілу середовищ. Для коливальної швидкості частинок середовища [5]:

$$\begin{aligned}v(x, t) &= -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = k\varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \\ &= k\varphi_{\max} \cos(\omega t - kx) = v_{\max} \cos(\omega t - kx).\end{aligned}\quad (3)$$

Крім того залежність акустичного тиску p від похідної потенціалу коливальної швидкості φ по часу та густини середовища ρ_0 має вигляд [5]:

$$\begin{aligned}p(x, t) &= \frac{\partial \varphi}{\partial x} \rho_0 = \rho_0 \omega \varphi_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \\ &= \rho_0 \varphi_{\max} \cos(\omega t - kx) = p_{\max} \cos(\omega t - kx).\end{aligned}\quad (4)$$

Як видно з рівнянь (3) та (4), коливальна швидкість частинок середовища та зміна акустичного тиску повздовжньої хвилі знаходяться в одній фазі та зв'язані співвідношенням:

$$\begin{aligned}p(x, t) &= \rho_0 c_0 v(x, t) = \rho_0 c_0 v_{\max} e^{i(\omega t - kx)} = \\ &= \rho_0 c_0 v_{\max} \cos(\omega t - kx) = p_{\max} \cos(\omega t - kx).\end{aligned}\quad (5)$$

Вираз $\rho_0 c_0 = Z_0$ характеризує акустичний опір середовища.

Розглянемо випадок поширення коливань в безкінечному середовищі та їх проходження через границю розділу двох середовищ з різними акустичними властивостями (рис. 1, а).

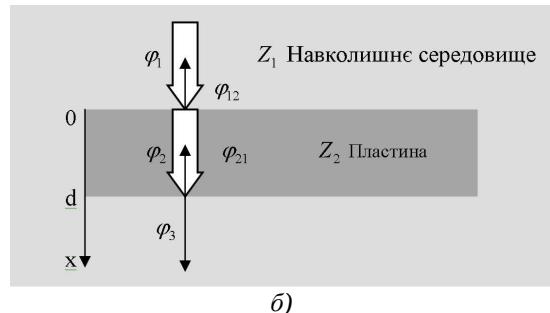
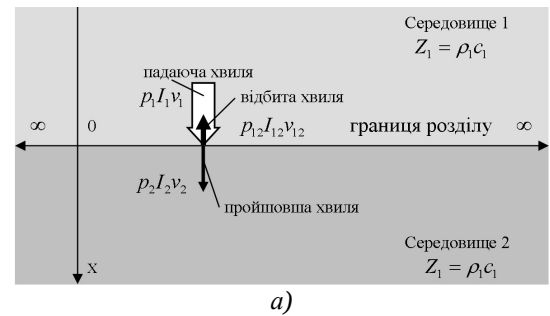


Рис. 1. Відбивання та проходження нормально падаючої хвилі на границі розподілу двох середовищ з різними акустичними властивостями (а) і через нескінченну пластину (б)

Середовище 1 характеризується певним значенням швидкості поширення акустичних коливань c_1 та густиною ρ_1 , падаюча хвиля – акустичним тиском p_1 та коливальною швидкістю v_1 . Хвиля, відбита від межі розподілу двох середовищ, описується акустичним тиском p_{12} та коливальною швидкістю v_{12} . Середовище 2 та пройшовша хвиля – c_2 , ρ_2 , p_2 , v_2 відповідно швидкістю поширення акустичних коливань, густиною, акустичним тиском та коливальною швидкістю. На границі розподілу двох середовищ сума коливальних швидкостей v падаючої та відбитої хвиль повинна бути рівною коливній швидкості пройшовшої акустичної хвилі та з умови рівності сил, що діють на межі розподілу, сума тисків падаючої та відбитої хвилі повинна бути рівною тиску, який спричинений пройшовшою хвилею. Також потрібно взяти до уваги баланс енергій I_1, I_{12}, I_2 - енергія падаючої, відбитої та пройшовшої хвиль відповідно. Ці твердження дають можливість записати наступні граничні умови (при $x=0$) [5]:

$$\vec{v}_1 + \vec{v}_{12} = \vec{v}_2, \quad p_1 + p_{12} = p_2, \quad I_1 - I_{12} = I_2 \Big|_{x=0}. \quad (6)$$

Провівши підстановку в рівняння (6) виразів (3) - (5) при $x=0$ та $t=0$ отримаємо наступні

формули для розрахунку коефіцієнтів відбиття R_p , та проходження T_p :

$$R_p = p_{12} / p_1 = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1); \quad (7)$$

$$T_p = p_2 / p_1 = 2Z_2 / (Z_2 + Z_1),$$

та коефіцієнти відбиття та проходження енергії акустичних коливань:

$$R = I_{12} / I_1 = R_p^2 = ((Z_1 - Z_2) / (Z_1 + Z_2))^2; \quad (8)$$

$$T = I_2 / I_1 = 1 - R^2 = 4Z_1Z_2 / (Z_1 + Z_2)^2,$$

оскільки енергія акустичних коливань I пропорційна квадрату тиску p - $I \sim p^2$.

Розглянемо випадок проходження ультразвукової хвилі через тонку нескінчену пластину (рис. 1б). В такому випадку перша границя розподілу проходить перпендикулярно до осі поширення хвилі через точку $x = 0$, друга – аналогічно в точці $x = d$. Хвильові рівняння для перпендикулярно падаючої, відбитої та пройшовшої хвилі на межі розділу двох середовищ ($x = 0$) є відповідно наступними:

$$\begin{aligned} \varphi_1(x, t) &= \varphi_{1\max} e^{i(\omega t - k_1 x)}; \\ \varphi_{12}(x, t) &= \varphi_{12\max} e^{i(\omega t + k_2 x)}; \\ \varphi_2(x, t) &= \varphi_{2\max} e^{i(\omega t - k_2 x)}. \end{aligned} \quad (9)$$

На другій межі розділу акустичних середовищ ($x = d$) пройшовша хвиля знову зазнає відбивання. Рівняння відбитої та пройшовшої хвилі відповідно матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_{21}(x, t) &= \varphi_{21\max} e^{i(\omega t + k_2 x)}; \\ \varphi_3(x, t) &= \varphi_{3\max} e^{i(\omega t - k_1 x)}. \end{aligned} \quad (10)$$

З граничних умов (6), на межі розділу двох середовищ ($x = 0$) потенціал коливальної швидкості описується рівняннями:

$$\begin{aligned} \rho_1(\varphi_1 + \varphi_{12}) &= \rho_2(\varphi_2 + \varphi_{21}) \\ k_1(\varphi_1 - \varphi_{12}) &= k_2(\varphi_2 - \varphi_{21}) \end{aligned} \Big|_{x=0}. \quad (11)$$

На другій межі розподілу середовищ при $x = d$:

$$\begin{aligned} \rho_2(\varphi_2 e^{-ik_2 d} + \varphi_{21} e^{ik_2 d}) &= \rho_1 \varphi_3 e^{-ik_1 d} \\ k_2(\varphi_2 e^{-ik_2 d} - \varphi_{21} e^{ik_2 d}) &= k_1 \varphi_3 e^{-ik_1 d} \end{aligned} \Big|_{x=d}. \quad (12)$$

Розв'язавши системи рівнянь (11) та (12), отримаємо загальний коефіцієнт відбиття по тиску та коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань:

$$R_p = \frac{\varphi_{12}}{\varphi_1} = \frac{Z_1 / Z_2 - Z_2 / Z_1}{\sqrt{(Z_1 / Z_2 + Z_2 / Z_1)^2 + 4 \cot^2(d \cdot k)}}; \quad (13)$$

$$T_I = 1 - (R_p)^2 = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} (Z_1 / Z_2 - Z_2 / Z_1)^2 \sin^2(d \cdot k)}.$$

Таким чином, записавши системи рівнянь (11) та (12) для ультразвукового перетворювача, який навантажений на повітря та складається з п'єзоелемента і узгоджуючого шару, після їх розв'язку отримаємо загальний коефіцієнт проходження енергії коливань [5, 6]:

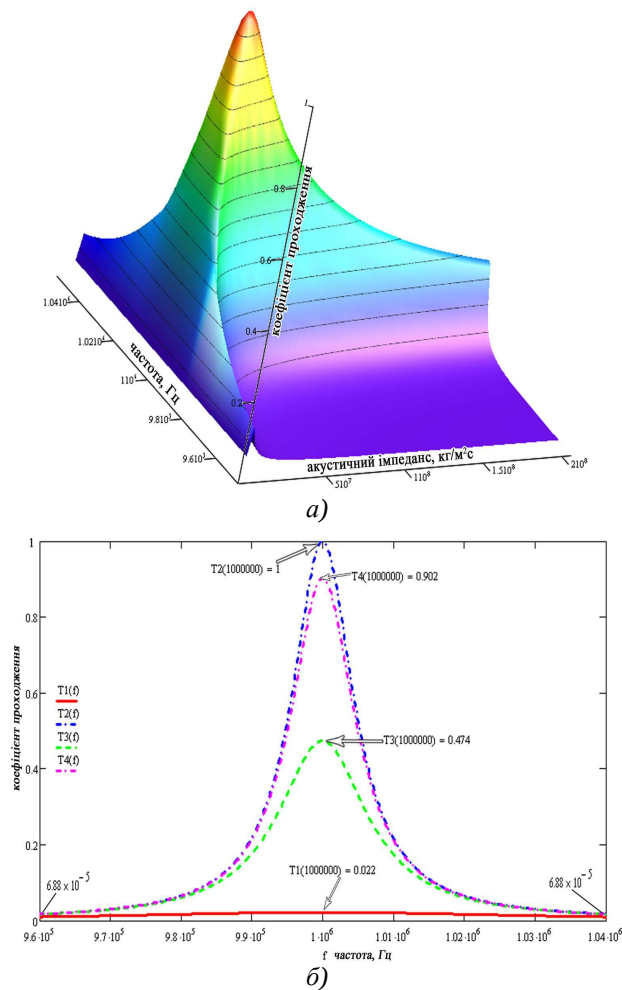
$$T_I = \frac{4 \cdot Z_1^{-1} \cdot Z_3}{\left(\frac{Z_3}{Z_1} + 1\right)^2 - \left(\left(\frac{Z_3}{Z_2}\right)^2 - 1\right) \cdot \left(\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^2 - 1\right) \cdot \sin^2(k \cdot d)}, \quad (14)$$

де Z_1, Z_2, Z_3 - акустичний опір п'єзоелемента, узгоджуючого шару та повітря відповідно.

В загальному випадку, якщо два середовища розділені третім шаром, товщиною d , то коефіцієнти відбивання та проходження залежать від співвідношення товщини шару та довжини хвилі. При перпендикулярному введенні хвилі чвертьхвильовий шар (або кратний йому) забезпечує збільшення коефіцієнта проходження, якщо акустичний імпеданс шару менший імпедансу першого середовища, але більший імпедансу другого середовища [7]. У випадку, коли $\sin kd = 1$, ($d = (2n+1)\lambda/4$), $n = 1, 2, \dots$ та

$Z_2 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_3}$, коефіцієнт проходження стає рівним 1 і енергія ультразвукової хвилі передається без втрат від п'єзокераміки до повітря (рис. 2,а). Отже збільшити коефіцієнт проходження ультразвукових коливань через межу розподілу п'єзоелемент-повітря можна, розмістивши узгоджуючий шар з певними фізичними та геометричними характеристиками між ними, що в свою чергу призведе до збільшення енергії акустичних коливань, що передається від п'єзопластики до повітря. Взявши відомі значення акустичних імпедансів п'єзометеріалу ($Z_1 = 25 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$ - титанат барію ТБК-3 [8]) та повітря ($Z_3 = 0,00043 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$), визначимо оптимальне значення акустичного імпедансу узгоджуючого шару: $Z_2 = 0,104 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 / \text{с}$.

Побудуємо згідно формули (14) графік залежності коефіцієнта проходження інтенсивності коливань від частоти для узгоджуючих шарів товщиною $\lambda/4$, виготовлених з пористої силіконової гуми, вулканізованої гуми, паперу вторинної переробки та матеріалу з оптимальним значенням акустичного імпедансу (рис. 2, б).



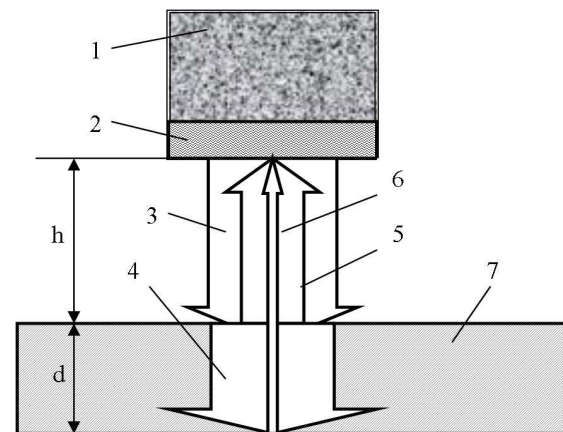
— $T1(f)$ - вулканізована гума; — — — $T2(f)$ - для узгоджувача шару з оптимальним значенням акустичного імпедансу; ... $T3(f)$ - папір вторинної переробки; - · - $T4(f)$ - пориста силіконова гума

Рис. 2. Залежність коефіцієнта проходження від частоти та імпедансу п'єзоелемента для узгоджувача шару з оптимальним значенням акустичного імпедансу (а) та залежність коефіцієнта проходження від частоти для вказаних матеріалів узгоджувачів шарів

Таким чином, як видно з графіків рис.2, для досягнення максимального значення коефіцієнта пропускання енергії акустичних коливань, важливим є вибір матеріалу узгоджувача шару. Для порівняння, за формулою (8), розрахуємо коефіцієнт проходження енергії акустичних коливань для п'єзоперетворювача без узгоджувача шару навантаженого на повітря: $T_l = 0,0000688$. Таким чином використання узгоджувача шару, наприклад з пористої силіконової гуми, дозволить збільшити коефіцієнт пропускання енергії акустичних коливань від п'єзоматеріалу до повітря більш ніж в 10 000 раз. Також можливо використати узгоджувач шар для

збільшення коефіцієнта передачі енергії на границі розподілу повітря-досліджуваній об'єкт. Проте виготовлення та прикріплення узгоджувачів шарів є досить дорогою та тривалою процедурою, що унеможливає їх використання при великих об'ємах контролю. Тому при використанні безконтактних методів контролю необхідно враховувати величину втрат енергії акустичних коливань на границі розподілу повітря-досліджуваній матеріал.

Проведемо розрахунок та побудуємо залежність величини енергетичних втрат ультразвукових коливань від частоти при безконтактному методі вимірювання товщини сталеві пластина (рис. 3).



1 - п'єзоелектрична пластина; 2 - узгоджувач шар; 3 - падаюча хвиля; 4 - пройшовша хвиля; 5 - хвиля відбита від зовнішньої поверхні об'єкта контролю (ОК); 6 - хвиля відбита від внутрішньої поверхні ОК; 7 - ОК (сталеві пластина); h - відстань від перетворювача до ОК; d - товщина пластини

Рис. 3. Ультразвуковий безконтактний спосіб вимірювання товщини матеріалів

Для порівняння розрахунок проведемо для двох п'єзоперетворювачів. В першому випадку як матеріал узгоджувача шару перетворювача виберемо пористу силіконову гуму, в другому - папір вторинної переробки. Як і в першому, так і в другому випадках як збуджувачий елемент виберемо п'єзопластину, виготовлену з титанату барію ТБК-3 діаметром $a = 20$ мм, резонансна частота якої складає $f = 1$ МГц. Для запропонованих перетворювачів приблизне значення границі ближньої зони обчислюється за формулою:

$$r = a^2 / \lambda = a^2 \cdot f / c = 0,302 \text{ м}, \quad (15)$$

де $c = 331$ м/с - швидкість поширення акустичних коливань в повітрі.

Отже, враховуючи те, що акустичні коливання поширюються від перетворювача до ОК і відбившись

від ОК до перетворювача, в нашому випадку відстань від перетворювача до об'єкта контролю (рис. 3) повинна бути рівною $h = 160 \text{ мм}$.

Втрати потужності акустичних коливань для даного способу вимірювання можна записати наступним чином:

- для акустичних коливань відбитих від зовнішньої поверхні ОК:

$$N_{1|_{об}} = 2 \cdot (T_T + A_{нов}) + R_1, \quad (16)$$

де T_T - втрати у перетворювачі через узгоджуючий шар, $A_{нов}$ - зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в повітрі, R_1 - втрати енергії відбитої хвилі на границі повітря – ОК (зовнішня поверхня).

- для акустичних коливань відбитих від внутрішньої поверхні:

$$\begin{aligned} N_{2|_{об}} &= 2 \cdot (T_T + A_{нов} + A_{ОК} + T_1) + R_2 = \\ &= N_{1|_{об}} + 2(A_{ОК} + T_1), \end{aligned} \quad (17)$$

де $A_{ОК}$ - зменшення інтенсивності ультразвукової хвилі в ОК, T_1 - втрати енергії пройшовшої хвилі на границі ОК – повітря (внутрішня поверхня), R_2 - втрати енергії відбитої хвилі на границі ОК – повітря.

Втрати у перетворювачі через узгоджуючий шар T_T товщиною чверті довжини хвилі можна виразити через коефіцієнт проходження енергії коливань (14) наступним чином:

$$T_T = 10 \lg(I_2 / I_1) = 10 \lg T_I, \quad (18)$$

де I_1, I_2 - інтенсивності акустичних коливань падаючої та пройшовшої хвиль відповідно.

Втрати енергії відбитої та пройшовшої (8) хвилі на границі розподілу двох середовищ можна визначити:

$$\begin{aligned} R_{1,2} &= 10 \lg(I_{12} / I_1) = 10 \lg((Z_3 - Z_4) / (Z_3 + Z_4))^2; \\ T_1 &= 10 \lg(I_2 / I_1) = 10 \lg(4Z_3 Z_4 / (Z_3 + Z_4)^2), \end{aligned} \quad (19)$$

де I_{12} - інтенсивність акустичних коливань відбитої хвилі, $Z_4 = 46,2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2 \text{с}$ - акустичний опір ОК (стальна пластина).

Втрати, які пов'язані з зменшенням інтенсивності ультразвуку в матеріалі, визначаються затуханням. Величину затухання характеризують

параметром N_a (числом від'ємних децибел), на яке зменшується амплітуда сигналу на відстані 1 м:

$$\begin{aligned} N_a &= 8,686 \cdot \delta = A_{ОК} = \\ &= 8,686 \cdot \delta_{ОК} = 3,9 \text{ дБ/м}, \end{aligned} \quad (20)$$

де $\delta_{ОК} = 0,45 \cdot \text{м}^{-1}$ - коефіцієнт затухання ультразвукових коливань в ОК [7].

Затухання ультразвуку в повітрі можна приблизно визначити при нормальних умовах з наступного рівняння [9]:

$$A_{нов} = 1,64 f^2 10^{-10}, \text{ дБ/м}, \quad (21)$$

де f - частота системи. При частоті 1 МГц це затухання становить 164 дБ/м.

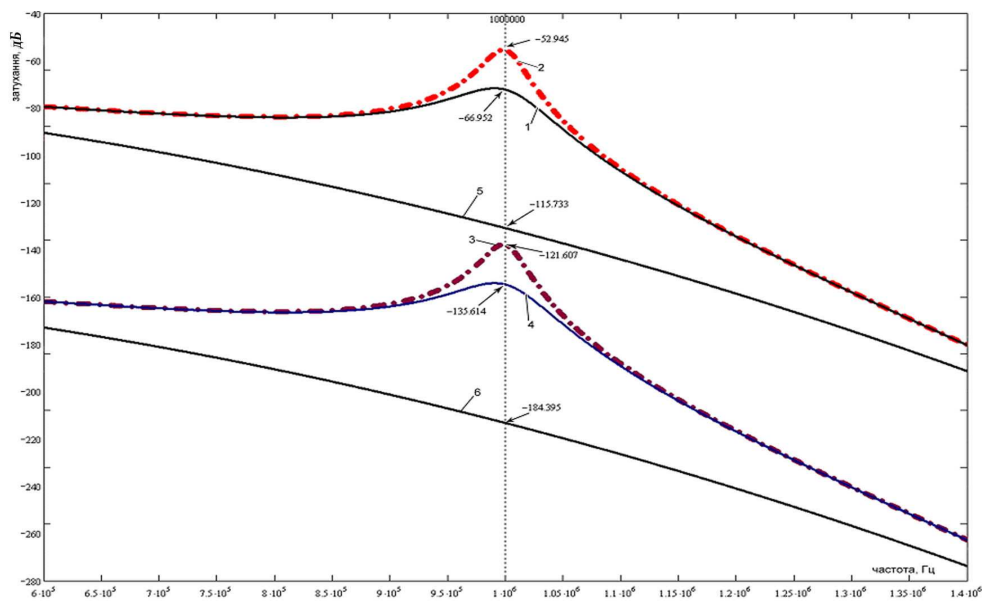
Після проведення розрахунків згідно з формул (16) ÷ (21) отримаємо наступні значення (для товщини пластини $d = 10 \text{ мм}$): для п'єзоперетворювача з узгоджуючим шаром, виготовленим з пористої силіконової резини - $N_{1|_{об}} = -53,376 \text{ дБ}$, $N_{2|_{об}} = -142,738 \text{ дБ}$; для п'єзоперетворювача з узгоджуючим шаром, виготовленим з паперу вторинної переробки - $N_{1|_{об}} = -58,965 \text{ дБ}$, $N_{2|_{об}} = -148,327 \text{ дБ}$; для п'єзоперетворювача без узгоджуючого шару - $N_{1|_{об}} = -135,729 \text{ дБ}$, $N_{2|_{об}} = -225,091 \text{ дБ}$.

Побудуємо графічну залежність величини втрат акустичної енергії від частоти (рис. 4) для п'єзоелектричного перетворювача з одним узгоджуючим шаром товщиною чверть довжини хвилі, при вимірюванні безконтактним акустичним методом товщини сталевієї пластини.

Отже використання узгоджуючого шару виготовленого з пористої силіконової резини зменшує втрати енергії акустичних коливань при вимірюванні безконтактним ультразвуковим методом товщини сталевієї пластини на біль ніж 82 дБ. При використанні узгоджуючого шару, виготовленого з паперу вторинної переробки, ці втрати зменшуються більш ніж на 76 дБ.

За результатами проведеного математичного моделювання та розрахунків можна зробити наступні висновки про проведenu роботу:

- проаналізовано основні проблеми, які виникають при розробці безконтактних ультразвукових перетворювачів та запропоновано шляхи їх вирішення;



1, 3 - узгоджувачий шар виготовлений з пористої силіконової резини; 2, 4 - узгоджувачий шар виготовлений з паперу вторинної переробки; 5, 6 - без узгоджувачого шару; 1, 2, 5 – акустичні коливання відбиті від зовнішньої поверхні ОК; 3, 4, 6 – від внутрішньої поверхні ОК

Рис. 4. Залежність величини втрат енергії акустичних коливань від частоти для п'єзоелектричного перетворювача з одним узгоджувачим шаром при вимірюванні безконтактним акустичним методом товщини сталевий пластини через повітря

- розроблено математичну модель для розрахунку процесу поширення ультразвукових коливань та визначено оптимальні фізичні (акустичний імпеданс) та геометричні (товщина) характеристики узгоджувачого шару, доказано доцільність його використання;

- розраховано втрати енергії акустичних коливань та побудовано залежності величин втрат від частоти для різних матеріалів узгоджувачих шарів;

- розраховано втрати енергії акустичних коливань при безконтактному вимірюванні товщини сталевий пластини через повітря для двох різних узгоджувачих шарів та для перетворювача без узгоджувачого шару. Використання узгоджувачого шару, виготовленого з пористої силіконової резини, дозволяє зменшити енергетичні втрати ультразвукових коливань на більш ніж 82дБ;

- з проведених розрахунків та графічних побудов запропоновано використати пористу силіконову резину або папір вторинної переробки в якості матеріалу для виготовлення узгоджувачого шару.

1. І.В. Рибіцький, О.М. Карпаш, М.О. Карпаш. Аналіз безконтактних методів ультразвукового контролю матеріалів і виробів. // Збірник наукових

праць. Серія Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів, випуск 12 «Неруйнівний контроль та технічна діагностика матеріалів і конструкцій». – Львів, 2007. – С. 111 – 116. 2. Р.-Й. Кажис. Ультразвукові інформаційно-вимірні системи. - Вільнюс: Мокслас, 1986. – 216 с. 3. Т. Е. Gómez y F. Montero. Piezoelectric transducers for air-coupled operation in the frequency range 0.3-2.5 MHz. IEEE International Ultrasonics Symposium, Atlanta 7-10, 2001. 4. И. И. Теулин. Ультразвуковые колебательные системы. – М.: МАШГИЗ, 1959. – 331 с. 5. Sutilov, V.A., Physik de Ultraschalls, Wien, New York, Springer Verlag, (1984). 6. Lorh J., Moeglichkeiten zur Verbesserung von Luftultraschallsystemen, PhD-thesis, Fachbereich 6, Verfahrenstechnik, Technischen Universitaet Berlin, (1998). 7. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. В 2-х кн / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. Кн. 2. М.: Машиностроение, 1995. – 448 с. 8. Смажеская Е. Г., Фельдман Н. Б. Пьезоэлектрическая керамика. М., Изд-во «Советское радио», 1971, 200стр., т. 4200 экз. 9. Bass H.E., Sutherland L.C., Zuckerwar A.J., Blackstock D.T., Hester D.M. Atmospheric absorption of sound: further developments. J Acoust Soc Am 1995;97(1):680-3.