

Акустические приборы и системы

УДК 534.232

Корекція АЧХ п'єзоелектричного перетворювача для медичної діагностики за допомогою електричних та акустичних узгоджувальних елементів

Т.М. Желяскова

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна.

Обґрунтовано вибір узгоджувальних елементів для розширення частотної смуги пропускання п'єзоперетворювача. Використовуючи метод еквівалентних чотирьохполюсників та статистичні методи оптимізації, отримано оптимальні параметри перетворювача для забезпечення максимальної смуги АЧХ, із заданою допустимою нерівномірністю. Бібл. 8, рис. 3, табл. 1.

Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, ширина частотної смуги пропускання, узгоджувальний елемент, коригувальні кола, перехідний шар.

Вступ

В медичній діагностиці все частіше починають використовувати широкосмугові системи, це зумовлено, перш за все, тим, що розширення робочої смуги частот перетворювача покращує показники ультразвукових (УЗ) приладів (наприклад чутливість і роздільність) та дозволяє використовувати один перетворювач у всьому діапазоні частот УЗ діагностики. Крім того, розширення смуги пропускання дає можливість випромінювати у дослідний об'єкт акустичні сигнали необхідної форми, й приймати УЗ імпульси, після взаємодії з об'єктом дослідження, без спотворення їх форми (частотного спектра), що підвищує надійність результатів дослідження.

Ілюстрацією того, що дає розширення смуги частот п'єзоперетворювача, може бути отримане за допомогою сканера VFX-13-5 Multi-DTM фірми Siemens, зі смугою 5-13 МГц і двовимірним фокусуванням, зображення каналу хребта, можливість УЗ дослідження якого раніше навіть не обговорювалася.

Змінювати форму амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) електроакустичного тракту в широких межах можна шляхом підключення до п'єзоелементу (як в режимі випромінювання, так

і в режимі прийому) коригувальних R, L, C-кіл у різних комбінаціях. Теоретичні та експериментальні дослідження [3] показали, що за однакової ширини АЧХ коефіцієнт подвійного електромеханічного перетворення при використанні коригувальних електричних кіл значно більший, ніж при механічному і електричному демпфуванні.

Розширенню АЧХ п'єзоелектричних перетворювачів [1-3,5-7], також, сприяє застосування перехідних шарів між п'єзоелементом і середовищем (біологічною тканиною), в яку він випромінює (з якої приймає) УЗ коливання. Зміна параметрів перехідних шарів дозволяє покращити узгодження акустичних імпедансів перетворювача та робочого середовища, в наслідок чого зменшуються втрати перетворення. Гарне узгодження необхідно, аби забезпечити передачу з мінімальними втратами УЗ сигналів від п'єзоелемента в біологічну тканину і навпаки, а отже, підвищити чутливість датчика.

Методам розширення смуги пропускання присвячено велику кількість робіт. Наприклад, слід відзначити роботу [6], де розглянуто питання акустичного узгодження і дані граничні значення смуги пропускання п'єзоперетворювача з перехідними шарами, число яких варіюється від одного до чотирьох. При деяких умовах вибір типу і числа узгоджувальних елементів, наприклад, перехідних шарів, може бути обмежений конструктивними вимогами або технологічними можливостями, і тоді необхідно вирішувати задачу про комплексне використання акустичних та електричних узгоджувальних елементів. У цьому випадку істотний вплив на граничне значення смуги пропускання п'єзоперетворювачів має величина коефіцієнта електромеханічного зв'язку, як це впливає з робіт [7,8].

Задача аналізу роботи перетворювача в широкій смузі частот зводиться до пошуку деяких оптимальних співвідношень між параметрами самого перетворювача, погоджувальних

електричних та акустичних елементів, які забезпечують граничні значення смуги пропускання.

У випадку перетворювача для медичної ультразвукової діагностики, особливістю якого є робота на біологічний об'єкт (середовище з малим хвильовим опором та з більшим загасанням) в ехо-режимі – важливе значення має також його коефіцієнт подвійного електромеханічного перетворення. Подібні завдання відносять до задач багатопараметрової оптимізації, якщо вважати функцією оптимізації смугу пропускання перетворювача [1,4].

Знаходження оптимальних параметрів перетворювача для забезпечення максимальної смуги АЧХ, із заданою допустимою нерівномірністю, доцільно проводити у два етапи: методом еквівалентних чотириполосників отримати модель акустичної системи та аналітичні співвідношення для визначення області зміни поблизу тих параметрів, які найбільш суттєво впливають на ширину смуги пропускання; статистичним методом провести остаточну оптимізацію.

Метод чотириполосників

Для розрахунку передатних функцій п'єзоперетворювачів використовують метод еквівалентних чотириполосників. Для розрахун-

ку необхідні матриці коефіцієнтів, що описують як електричні, так і механічні елементи систем. При цьому особливе місце займає еквівалентний чотириполосник електро-механічного перетворювача, що зв'язує електричні параметри з механічними.

Для п'єзоперетворювача, що працює в режимі випромінювання, вхідними впливами є електричні, а вихідними – механічні. На підставі електромеханічних аналогій за механічні впливи прийнято коливальну силу F і швидкість v на активній поверхні п'єзоперетворювача. Механічні елементи ультразвукових систем у вигляді шарів деяких матеріалів описують за допомогою матриць коефіцієнтів, що зв'язують силу й коливальну швидкість на одній поверхні цього шару із силою й коливальною швидкістю на іншій поверхні.

При складанні еквівалентного чотириполосника п'єзоелектричної пластинки вважається, що пластинка (товщиною l_0 та площею металізованих еквіпотенціальних поверхонь A_0) з акустичним імпедансом z_0 , з однієї сторони навантажена питомим акустичним імпедансом z_1 , а з іншої сторони – z_2 . Активною поверхнею вважається поверхня, навантажена на z_2 .

Для розширення смуги пропускання авторами [6] запропонована система (рис. 1), для застосування в режимі випромінювання.

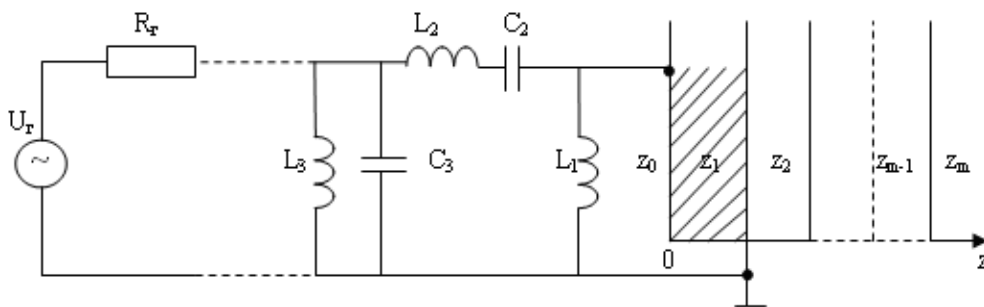


Рис. 1. Розрахункова схема багатопараметрового п'єзоперетворювача

Представлена система (рис. 1) має демпфер – п'єзоелемент – проміжний шар – ... – проміжний шар – акустичне навантаження, з хвильовими опорами $z_0, z_1, z_2, \dots, z_{m-1}, z_m$ відповідно. Джерело збудження з е.р.с. U_T і внутрішнім опором R_T підключено до п'єзоелемента через N-ланковий пасивний електричний чотириполосник. Акустичне навантаження задане хвильовим опором z_m , а п'єзоелемент – хвильовим опором z_1 .

Закономірністю такої системи є зростання смуги пропускання зі збільшенням коефіцієнту електромеханічного зв'язку, причому зростання

смуги пропускання супроводжується зменшенням коефіцієнту енергоємності K .

Широкосмугові п'єзоперетворювачі є за своєю сутністю малопотужні в порівнянні з резонансними п'єзоперетворювачами. Так, у випадку роботи на граничній електричній напрузі, при переході від резонансного до широкосмугового режиму, випромінювальна акустична потужність зменшується в K раз. Таким чином, збільшення полоси пропускання п'єзоперетворювачів неминуче пов'язано з ростом втрат енергії.

Розрахунок нормованих передатних функцій п'єзоперетворювача з двома акустичними

перехідними шарами та корегувальними електричними колами для режимів випромінювання

та прийому проводять за наступними виразами:

$$\Phi_B(x) = \frac{1}{2\sqrt{\left(S_{11}^{(3)}X - \frac{S_{12}^{(3)}}{iA_0z_m}M + iA_0z_1S_{21}^{(3)}Y + \frac{z_1}{z_m}S_{22}^{(3)}N\right)^2 + \left(S_{11}^{(3)}M + \frac{S_{12}^{(3)}}{iA_0z_m}X + iA_0z_1S_{21}^{(3)}N + \frac{z_1}{z_3}S_{22}^{(3)}Y\right)^2}}, \quad (1)$$

$$\Phi_n(x) = \frac{z_m/z_1}{2\sqrt{\left(S_{22}^{(3)}X_1 + iA_0z_mS_{21}^{(3)}Y_1 - \frac{S_{12}^{(3)}}{iA_0z_1}N_1 + S_{11}^{(3)}\frac{z_m}{z_1}M_1\right)^2 + \left(S_{22}^{(3)}Y_1 - iA_0z_mS_{21}^{(3)}X_1 + \frac{S_{12}^{(3)}}{iA_0z_1}M_1 + S_{11}^{(3)}\frac{z_m}{z_1}N_1\right)^2}}, \quad (2)$$

де $S_{ij}^{(3)}$ – коефіцієнти матриці двошарової структури перехідних шарів; $X, Y, N, M, X_1, Y_1, N_1, M_1$ – вирази що визначають тип електричного навантаження відповідно для режимів випромінювання та прийому.

Абсолютні значення відповідних передатних функцій визначаються як:

$$K_B(x) = \frac{2e_{33}}{I_0} \Phi_B(x) e^{i\varphi_B(x)}, \quad (3)$$

$$K_n(x) = \frac{4e_{33}}{\omega_0 \varepsilon^s z_m} \Phi_n(x) e^{i\varphi_n(x)}, \quad (4)$$

де e_{33} – п'єзоелектрична стала, ε^s – діелектрична проникливість, $\varphi_B(x)$, $\varphi_n(x)$ – фазочастотні характеристики перетворювача.

Розрахунки [6] показали що смуга пропускання як функція $2(N+S)$ параметрів (S – кількість шарів) є багатоекстремальною. Це суттєво ускладнює пошук глобального максимуму та зменшує достовірність отриманих результатів з ростом кількості параметрів при використанні детермінованих методів пошуку. Тому, для оптимізації багатопараметрових п'єзоперетворювачів на максимум смуги пропускання доцільно використовувати статистичні методи оптимізації параметрів.

Статистичний метод оптимізації

В [4] розглядалося завдання пошуку максимуму смуги пропускання перетворювача з двома перехідними шарами та коригувальними колами, таким статистичним методом оптимізації, який реалізується алгоритмом «незалежного» глобального пошуку, що є розширеним методом алгоритму з поверненням при невдалому кроці. Алгоритм цього пошуку може бути записаний у вигляді наступних рекурентних формул для вмісту пам'яті:

$$X_i^0 = \begin{cases} X_{i-1}^0, & \text{якщо } Q(X_i) \geq Q_{i-1}^0, \\ X_i, & \text{якщо } Q(X_i) < Q_{i-1}^0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$Q_i^0 = \begin{cases} Q_{i-1}^0, & \text{якщо } Q(X_i) \geq Q_{i-1}^0, \\ Q(X_i), & \text{якщо } Q(X_i) < Q_{i-1}^0 \end{cases}, \quad (6)$$

де X_i – i -тий випадковий стан, обраний відповідно до заданої щільності розподілу $p(X)$; X_i^0 , $Q_i^0 = Q(X_i^0)$ – вміст пам'яті на i -ому кроці пошуку.

Цей алгоритм гарантує відшукання глобального екстремуму при великих N і за певної густини розподілу $p(X)$,

Основна ідея методу – у будь-якій точці рухатися у напрямку найбільшого локального зменшення цільової функції, тобто у напрямку найшвидшого спуска. Один крок у напрямку найшвидшого спуска в загальному випадку не приводить до точки мінімуму. Тому ітераційна формула $X_{k+1} = X_k + \lambda_k S_k$ (де $k=0, 1, \dots$ – номер кроку; S_k – одиничний вектор, що є вектором напрямку кроку; λ_k – скалярна величина, що є довжиною кроку.) повинна застосовуватися багаторазово (для всіх параметрів оптимізації), поки мінімум не буде досягнутий.

Розглянутий метод не залежить від вибору вектора напрямку S_k і довжини кроку λ_k , вони визначають стратегію спуска й успішність застосування методу.

На першому етапі побудови алгоритму задаються параметрами оптимізації та межами їх зміни (табл. 1).

На другому етапі відбувається установка параметрів бажаної резонансної частоти й ширини смуги пропускання. Далі визначають частоти, на яких коефіцієнт передачі досягає своїх локальних максимумів і мінімумів на деякому заданому діапазоні частот.

На третьому етапі відбувається розрахунок чисельного значення критерію який дозволяє домогтися:

- максимального розширення смуги функції передачі;
- допустимої нерівномірності в смузі;
- збільшення максимального середнього значення коефіцієнта передачі в смузі.

На четвертому етапі за деяких випадково заданих значень параметрів оптимізації формується певний вид коефіцієнта передачі.

Розрахунок коефіцієнтів передачі для режимів випромінювання та прийому проводиться за допомогою виразів отриманих методом чотириполюсників.

Таблиця 1. Межі зміни параметрів оптимізації

Параметри оптимізації	Межі зміни
L_1, L_2, L_3	$10^{-3}-10^{-7}$ Гн
C_2, C_3	$10^{-3}-10^{-14}$ Ф
R_r	100–102 Ом
Акустичний опір шарів Z_2, Z_3	$2 \cdot 10^6 - 38,4 \cdot 10^6$ кг/м ² ·с (епоксидна смола, фенопласт, дві частки воску і одна частка каніфолі, вольфрам+олово, олово+нікель+галій,)
Товщина п'єзопластини l_0	$10^{-2}-10^{-4}$ м
Тип п'єзокераміки	[5.. 24]
Відносні товщини шарів n_2, n_3	0,1–0,5 довжини хвилі
Тип демпфера	(пінопласт поліуретановий, епоксидна смола, дві частки воску і одна частка каніфолі, олово+нікель+галій, вольфрам+олово)

В результаті застосування алгоритму «незалежного» глобального пошуку отримано нижче приведені оптимальні параметри електроакустичної системи, які забезпечують максимальну смугу пропускання. А саме:

Параметри п'єзопластини – $A_0=10^{-5}$ м², $l_0=0,26$ мм, ТБ-1.

Параметри перехідних шарів: $Z_2=10,3 \cdot 10^6$ кг/м²·с – фенопласт/W/90; $n_2=0,292$; $Z_3=2,98 \cdot 10^6$ кг/м²·с – ЭД-5/PbO/30; $n_3=0,27$.

Робоче середовище – біологічна тканина.

Тильне навантаження – повітря.

В результаті оптимізації отримано нормовані передатні функції для режиму випромінювання (рис. 2), з параметрами коригувальних кіл: $L_1=0,00066$ мГн, $L_2=0,00041$ мГн, $L_3=0,00041$ мГн, $C_2=1,17$ нФ, $C_3=0,01$ нФ, $R_r=5,77$ Ом; та для режиму прийому (рис. 3) з параметрами коригувальних кіл: $L_1=0,0013$ мГн, $L_2=0,0034$ мГн, $L_3=0,0021$ мГн, $C_2=4,44$ нФ, $C_3=88,7$ нФ, $R_r=23,45$ Ом.

Розмірні величини коефіцієнтів передачі на частоті резонансу згідно з (3) і (4) отримуємо відповідно:

$$K_B = 22,46 \text{ кПа/В},$$

$$K_{\Pi} = 13,8 \text{ мкВ/Па}.$$

Також, алгоритмом незалежного глобального пошуку визначено частоти на яких коефіцієнт передачі п'єзоперетворювача досягає своїх локальних максимумів $f_{K_{\max}} = 5$ МГц і мінімумів $f_{K_{\min}} = 7,5$ МГц та на частоті резонансу визначено коефіцієнт подвійного перетворення $K = K_B K_{\Pi} = 0,31$.

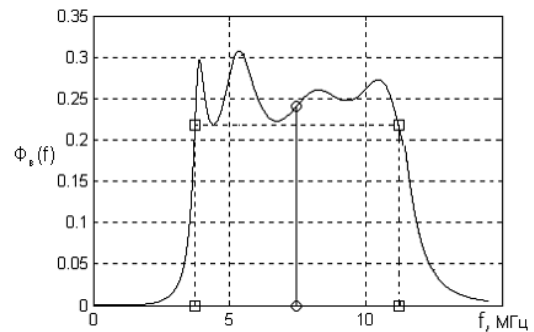


Рис. 2. Нормована передаточна функція перетворювача з двома узгоджувальними шарами та електричними коригувальними колами в режимі випромінювання $\Phi_B(f)$

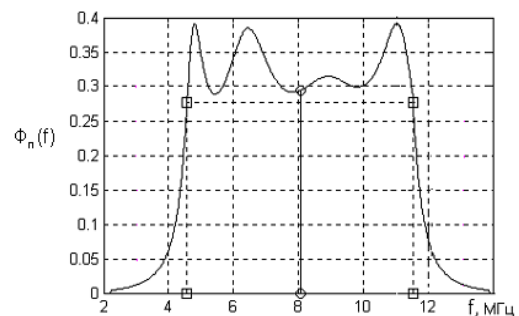


Рис. 3. Нормована передаточна функція перетворювача з двома узгоджувальними шарами та електричними коригувальними колами в режимі прийому $\Phi_{\Pi}(f)$

Висновки

Отримано, використовуючи метод еквівалентних чотирьохполюсників, аналітичні співвідношення для визначення параметрів широкопосмугових п'єзоперетворювачів. Методом незалежного глобального пошуку визначено параметри погоджувальних акустичних перехідних шарів та електричних корегувальних кіл, що забезпечують максимальну відносну смугу пропускання ~100%, у випадку відсутності демпфера в конструкції п'єзоперетворювача, та визначено частоти, на яких коефіцієнт передачі п'єзоперетворювача досягає своїх локальних максимумів і мінімумів.

Література

1. Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б. О влиянии величины коэффициента электромеханической связи на полосу пропускания стержневых пьезокерамических преобразователей с переходным слоем. // Акуст. ж., 1974, т.20, № 3, с. 469-470
2. Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б. О расширении полосы пропускания пьезокерамических преобразователей с помощью переходных слоев. // Акуст. ж., 1974, т.20, № 5, с. 663-668.
3. Домаркас В.И. Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи / В.И. Домаркас, Р.И.-Ю. Кажис – Вильнюс: Минтис, 1975. – 255 с.
4. Залесский В. В. Анализ и синтез пьезоэлектрических преобразователей. – Ростов: Изд. Ростовского университета. 1971, – 152 с.
5. Касаткин Б. А., Павин Н. Я. Сравнительный анализ и энергетические оценки широкополосных пьезопреобразователей. // Дефектоскопия, 1979, № 1, с. 61-66.
6. Касаткин Б. А., Павин Н. Я. Многопараметровая оптимизация и энергетические оценки широкополосных пьезопреобразователей. // Акуст. ж., 1980, т.26, № 5, с. 721-725.
7. Королев М. В., Карпельсон А. Е. Широкополосные ультразвуковые преобразователи. – М.: Машиностроение, 1982. – 157 с.
8. Найда С.А., Коржик А.В., Желяскова Т.Н. Статистические методы оптимизации параметров пьезопреобразователя // Системи обробки інформації. – 2012. – 2(100). – С. 241-245.

УДК 534.232

Коррекция АЧХ пьезоэлектрического преобразователя для медицинской диагностики с помощью электрических и акустических согласующих элементов

Т.М. Желяскова

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.

Обоснован выбор согласующих элементов для расширения частотной полосы пропускания пьезопреобразователя. Используя метод эквивалентных четырехполюсников и статистические методы оптимизации, получены оптимальные параметры преобразователя для обеспечения максимальной полосы АЧХ, с заданной допустимой неравномерностью. Библ. 8, рис. 3, табл. 1.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, ширина частотной полосы пропускания, согласующий элемент, корректирующие цепи, переходной слой.

UDC 534.232

Correction of amplitude-frequency response of piezoelectric transducers for medical diagnostic employment of electric and acoustic matching elements

T. M. Zheliaskova

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

The choice of matching elements to extend the frequency bandwidth of the piezoelectric transducer is substantiated. Using the method of equivalent quadrupoles and statistical optimization methods obtain optimal parameters of the converter for maximum band frequency response with a given allowable irregularity. References 8, figures 3, tables 1.

Keywords: *piezoelectric transducer, the width of the frequency bandwidth, matching element, corrective circuits, the transition layer.*

References

1. *Alekseev B.N., Dianov D. B. (1974), [Effect of electromechanical coupling coefficient for bandwidth core piezoelectric transducers with a transition layer]. Acoustical Journal, Vol.20, no 3, pp. 469-470 (Rus)*
2. *Alekseev B.N., Dianov D. B. (1974), [The extension of the bandwidth of piezoelectric transducers with transitional layers]. Acoustical Journal, Vol.20, no 5, pp. 663-668. (Rus)*
3. *Domarkas V.I. (1975), [Gauging piezoelectric transducers]. Vilnius: Mintis, P. 255. (Rus)*
4. *Zaleski V. V. (1971). [Analysis and synthesis of piezoelectric transducers]. Rostov: Publisher of Rostov University. P. 152. (Rus)*
5. *Kasatkin B. A., Pavin N. Y. (1980), [Multiparametric optimization and energy estimates of broadband piezoelectric transducers]. Acoustical Journal, Vol.26, no 5, pp. 721-725. (Rus)*
6. *Kasatkin B. A., Pavin N. Y. (1979), [Comparative analysis and energy estimates of broadband piezoelectric transducers]. Defectoscopy, no 1, pp. 61-66. (Rus)*
7. *Korolev M. V., Karpelson A. E. (1982), [Broadband ultrasound transducers]. Mashinostroenie, P.157. (Rus)*
8. *Naida S.A., Korzhik A.V., Zhelyaskova T.N. (2012), [Statistical methods for optimizing the parameters of the piezoelectric transducer]. Systems of processing information, no2 (100). pp. 241-245. (Rus)*

Поступила в редакцию 03 января 2013 г.