

УДК 620.179.16

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

М. М. Семеген, З. П. Лютак

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, тел. (03422)4-60-77

*Представлена удосконалена модель розрахунку амплітудно-частотної характеристики сигналів ультразвукових пристроїв. Описаний метод розрахунку перехідного процесу в електроакустичному тракту пристрою в режимах випромінювання та приймання. Приведена оцінка отриманих амплітудно-частотних характеристик системи.*

*Ключові слова: п'єзоелектричний перетворювач, луно-сигнал, ультразвуковий метод контролю, імпульсний режим, амплітудно-частотна характеристика, еквівалентна схема.*

*Представлена усовершенствованная модель расчета амплитудно-частотной характеристики сигналов ультразвуковых устройств. Описан метод расчета переходного процесса в электроакустическом тракте устройства в режимах излучения и приема. Приведена оценка сходимости полученных амплитудно-частотных характеристик системы.*

*Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, эхо-сигнал, ультразвуковой метод контроля, импульсный режим, амплитудно-частотная характеристика, эквивалентная схема.*

*The approach to account of decibel-log frequency characteristic of cues of defect scopes is observed. The transient phenomenon design technique in an electro acoustical section of a defect scope in emanation and reception regimes is presented. The estimation of convergence of the received decibel-log frequency characteristics of system is resulted.*

*Keywords: piezoelectric transformer, echo-signal, ultrasonic method of control, pulse-mode, gain-frequency description, equivalent chart.*

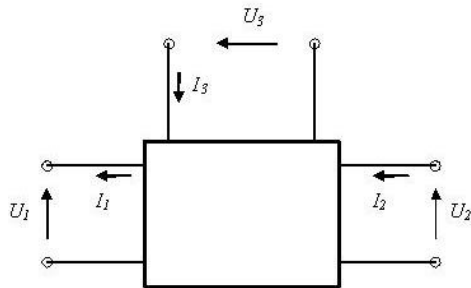
П'єзоелектричний перетворювач є основним вузлом при дослідженні фізико-механічних характеристик матеріалів ультразвуковим методом. При цьому, оцінку фізико-механічних властивостей виконують в залежності від параметрів прийнятого луно-сигналу для необхідного настроювання вторинних приладів, які проводяться на основі параметрів даних перетворювачів [1]. В більшості випадків в якості таких параметрів приймається амплітуда імпульсу або його часове положення. При дослідженні п'єзоелектричного перетворювача вхідними даними є механічні, електромеханічні й електричні характеристики використаних матеріалів при заданих умовах застосування перетворювача. Необхідно також знати ресурс роботи і зміну їх характеристик. У багатьох випадках потрібно проводити коригування параметрів вторинних приладів у процесі експлуатації системи контролю відповідно до зміни характеристик перетворювача. Тому необхідно досліджувати режим роботи п'єзоперетворювача, що може бути проведено на основі аналізу його роботи в імпульсному

режимі [2].

Вказана задача є досить складною, так як згадані характеристики визначаються параметрами електронних блоків ультразвукових пристроїв, зокрема, генератором та підсилювачем електроакустичного перетворювача та його тракту. Для того, щоб в результаті контролю отримати високу чутливість та точність вимірювань, необхідно з достатньою точністю описати роботу електроакустичного тракту дефектоскопа у часовій області. Однак до цього часу ця задача в повній мірі не вирішена. Відомі роботи, в яких розглядаються проблеми імпульсного режиму роботи п'єзоелектричного перетворювача [3]. Методи, які базуються на застосуванні перетворення Лапласа [4] та інтеграла Фур'є [5], досить трудомісткі для розрахунку навіть простих схем вмикання п'єзоелектричних перетворювачів. Викликано це тим, що вирішення таких задач є складною проблемою, оскільки відповідні рішення описати в аналітичному вигляді часто неможливо, а чисельні методи вирішення вимагають багато

часу і тому не завжди задовільні. Цей факт став основою для запропонованого підходу до розрахунку амплітудно-частотної характеристики сигналів дефектоскопів.

Розглянемо роботу чутливого елемента первинного перетворювача. При подаванні на електроди напруги у вигляді пікового імпульсу внаслідок п'єзоефекту пластина починає коливатись. У нашому випадку розглянемо поздовжні коливання, при яких п'єзопластина починає зміщуватись у напрямку поширення коливань. В цьому випадку чутливий елемент можна представити як електричну схему-аналог у вигляді шестиполосника, в якому одному входу відповідає електрична складова, а двом іншим – дві поверхні п'єзопластини (рис. 1).



$U_1, U_2$  – напруги шестиполосника, що відповідають силі деформації чутливого елемента;  $I_1, I_2$  – струми шестиполосника, які відповідають швидкості руху поверхні чутливого елемента;  $U_3, I_3$  – напруга та струм на електродах чутливого елемента

**Рисунок 1 - Еквівалентна схема роботи чутливого елемента первинного перетворювача у вигляді шестиполосника**

Розкриття електричної схеми-аналога чутливого елемента здійснено Н. Мезоном [6], при якому процес утворення коливання чутливого елемента внаслідок подавання електричного імпульсу на електроди представляється коливальним контуром паралельно з'єднаних конденсатора та котушки індуктивності. Більш удосконалену схему-аналог роботи чутливого елемента представлено в [1], де враховано навантаження проміжного шару, демпфера та об'єкта, в який вводяться ультразвукові коливання [1]. Недоліком представленої в [1] електричної схеми-аналогу є те, що в ній коливання чутливого елемента є ідеалізованими і продовжуються в часі без зменшення амплітуди. У реальному чутливому елементі коливання, що утворюються піковим електричним імпульсом, загасають в часі.

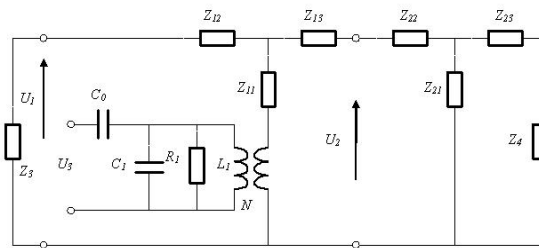
Для удосконалення схеми-аналогу

пропонуємо ввести в резонансний контур додатково резистор, що буде моделювати загасання коливань чутливого елемента, зменшення добротності коливального контура і відповідно зменшення тривалості його коливального процесу (рис. 2).

Ємність чутливого елемента обчислюється так [7]:

$$C_0 = \frac{\varepsilon^s A}{L}, \quad (1)$$

де  $A$  – площа поверхні чутливого елемента,  $L$  – товщина чутливого елемента,  $\varepsilon^s$  – діелектрична проникність чутливого елемента.



$Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}$  – опори, що відповідають затримці сигналу внаслідок поляризації чутливого елемента;  $Z_{21}, Z_{22}, Z_{23}$  – опори, що відповідають затримці сигналу в проміжному шарі;  $Z_3$  – опір демпфера;  $Z_4$  – опір об'єкта в який вводиться ультразвукова хвиля;  $C_1, L_1, R_1$  – електричні елементи, що утворюють коливання чутливого елемента;  $N$  – коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора, що відповідає електромеханічному перетворенню в чутливому елементі;  $C_0$  – ємність чутливого елемента

**Рисунок 2 - Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача**

Електричні параметри паралельного резонансного контура визначаються так [7]:

$$C_1 = \frac{C_0}{k_T^2}, \quad L_1 = \frac{k_T^2}{\omega^2 C_0}, \quad (2)$$

де  $k_T$  – коефіцієнт п'єзоелектричного зв'язку,  $\omega$  – частота коливань чутливого елемента.

Величина опору  $R_1$  вибирається із умови кількості коливань паралельного резонансного контура із амплітудою, не менше заданої. Коефіцієнт трансформації ідеального трансформатора знаходимо із такого співвідношення:

$$N = eA/L, \quad (3)$$

де  $e$  – п'єзоелектрична константа механічних

напружень при відсутності прикладеного електричного поля.

Опори  $Z_3$  та  $Z_4$  відповідають акустичним імпедансам матеріалам відповідно демпфера та об'єкта введення ультразвукової хвилі.

Опори поверхні чутливого елемента обчислюються так:

$$Z_{12} = Z_{13} = jZ_c \tan\left(\frac{\beta_a L}{2}\right),$$

$$Z_{11} = jZ_c \operatorname{cosec}(\beta_a L),$$

$$\beta_a = \omega \sqrt{\frac{\rho}{c^D}}, \quad Z_c = A \sqrt{\rho c^D}, \quad (4)$$

де  $Z_c$  – акустичний імпеданс п'єзопластини,  $\beta_a$  – константа поширення акустичної хвилі в п'єзоматеріалі,  $\rho$  – густина п'єзоматеріалу,  $c^D$  – пружна константа п'єзоматеріалу при відсутності прикладеного електричного поля.

Опори, що відповідають за поширення ультразвукових коливань в проміжному шарі, обчислюються так:

$$Z_{22} = Z_{23} = jZ_{csh} \tan\left(\frac{\beta_{ash} L_{sh}}{2}\right),$$

$$Z_{21} = jZ_{csh} \operatorname{cosec}(\beta_{ash} L_{sh}),$$

$$\beta_{ash} = \frac{\omega}{c_{lsh}}, \quad Z_{csh} = A \rho_{sh} c_{lsh}, \quad (5)$$

де  $Z_{csh}$  – акустичний імпеданс проміжного шару,  $\beta_{ash}$  – константа поширення акустичної хвилі в проміжному шарі,  $\rho_{sh}$  – густина проміжного шару,  $\omega$  – частота,  $c_{lsh}$  – швидкість поширення ультразвукової поздовжньої хвилі в проміжному шарі,  $L_{sh}$  – товщина проміжного шару.

Як матеріал п'єзопластини для проведення розрахунків було використано чутливий елемент ЦТС-5А. Вхідні дані для проведення розрахунку приведені в табл. 1.

Схема-аналог розраховувалась виходячи з того, що струм  $I$ , який протікає через конденсатор ємністю  $C$  та котушку індуктивності  $L$ , є таким:

$$I = C \frac{dU}{dt}, \quad I = L \frac{dU}{dt}, \quad (6)$$

де  $U$  – напруга,  $t$  – час.

Для проведення розрахунків імпульс генератора моделювався у вигляді пікового сигналу великої амплітуди (рис. 3).

Результуючі коливання в залежності від величини опору  $R_l$  показані на рис. 4. Напруга визначалась на виході проміжного шару та на вході в матеріал досліджуваного об'єкта ( $Z_4$ ).

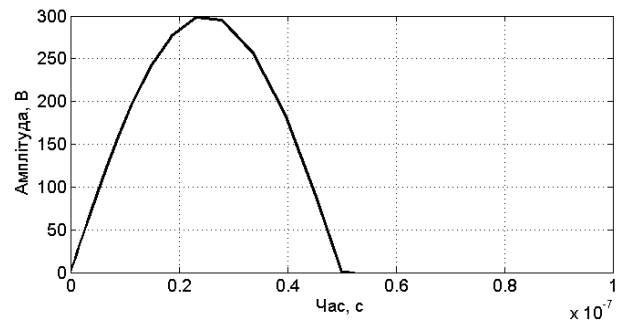


Рисунок 3 - Збуджуючий імпульс генератора напруги чутливого елемента

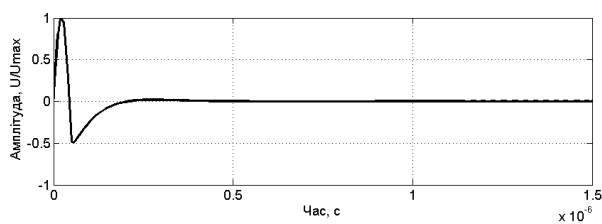
Таблиця 1 - Вхідні параметри проведення розрахунку чутливого елемента

Назва параметра	Значення
$L$ , м	$7,6 \cdot 10^{-4}$
Радіус п'єзопластини, м	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Частота, МГц	2,5
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7,75
$e$ , Кл/м <sup>2</sup>	15,8
$c^D$ , Н/м <sup>2</sup>	$14,7 \cdot 10^{10}$
$k_T$	0,49
$\rho_{sh}$ , кг/м <sup>3</sup>	1190
$c_{lsh}$ , м/с	2700
$L_{sh}$ , м	$6,802 \cdot 10^{-3}$
Густина сталі, кг/м <sup>3</sup>	7,85
Швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в сталі, м/с	5900

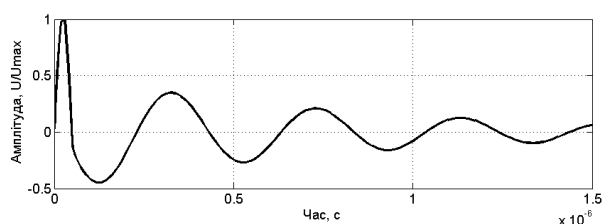
Як можна побачити із рис. 4, опір  $R_l$  вносить зміни у робочу частоту коливання чутливого елемента. При малому значенні опору  $R_l$  (рис. 4,а), коливання мають різкий загасаючий характер. Це вказує на значні механічні втрати чутливого елемента. Протилежний випадок роботи чутливого елемента показаний на рис. 4, в, де механічні втрати при перетворенні електричного імпульсу є незначними, що відповідає роботі в ненавантаженому режимі. На рис. 4,б зображено роботу чутливого елемента у режимі проведення неруйнівного контролю. У цьому режимі чутливий елемент збуджується електричним імпульсом, при якому проходить декілька коливань п'єзоелемента, що відповідає експериментальним даним.

В реальному чутливому елементі, як правило, поряд із основною частотою коливання є присутні і додаткові частоти. Ці додаткові частоти можуть вносити завади в зондуєчий сигнал акустичної частини чутливого елемента як в режимі випромінювання, так і в режимі приймання акустичного сигналу. З метою проведення аналізу роботи чутливого елемента

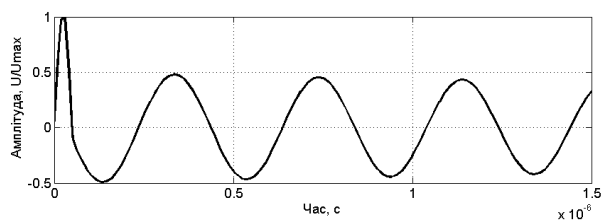
із присутніми бічними додатковими частотами удосконалимо електричну схему-аналог роботи чутливого елемента (рис.5).



а)



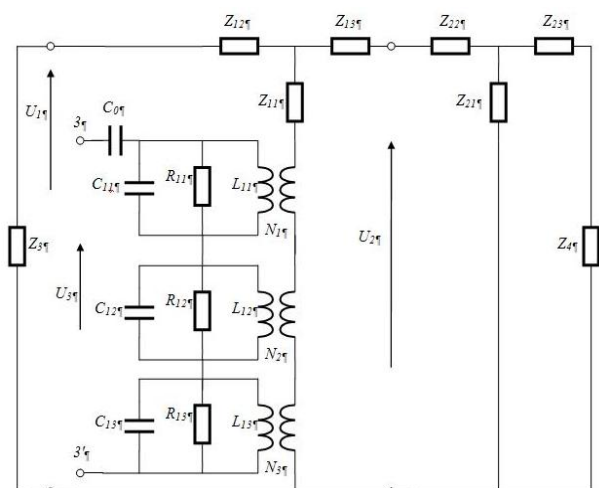
б)



в)

а) –  $R_1 = 25 \text{ Ом}$ ; б) –  $R_1 = 250 \text{ Ом}$ ; в) –  $R_1 = 2500 \text{ Ом}$

**Рисунок 4 - Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента**



**Рисунок 5 - Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача**

Для побудови амплітудно-частотної характеристики схеми, зображеної на рис. 5, враховані наступні залежності [7]:

– вхідний опір на клеммах 3-3' (рис. 5)

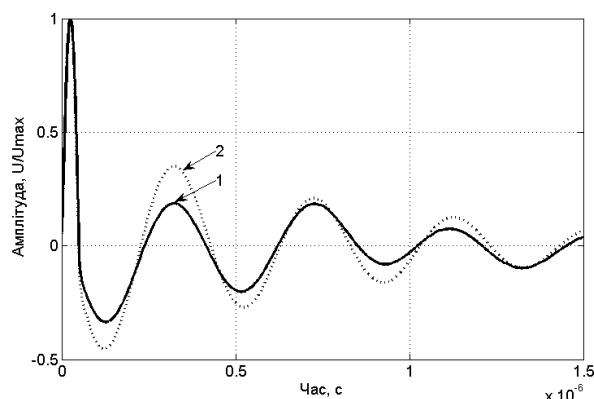
$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_0} \left[ 1 - \sum_n k_{eff,n}^2 + \sum_n \frac{j\omega k_{eff,n}^2}{(\omega_{0n}^2 - \omega^2) C_0} \right] = \quad (7)$$

$$= \frac{1 - k_T^2}{j\omega C_0} + \sum_n \frac{j\omega k_{eff,n}^2}{(\omega_{0n}^2 - \omega^2) C_0}$$

– для спрощення опір  $Z_3$  можна визначити так:

$$Z_3 \approx \frac{1 - k_T^2}{j\omega C_0} + \frac{8}{\pi^2} \frac{j\omega k_T^2 / C_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (8)$$

Результуючий сигнал на виході перехідного шару чутливого елемента з урахуванням бічних гармонік представлений на рис. 6, з якого можна побачити, що вплив бічних гармонік змінює амплітуду вихідного сигналу, перерозподіляючи його енергію між періодами коливань. Це дозволяє проводити більш точний аналіз луно-сигналу.



1 – вихідний сигнал, який сформований трьома резонансними контурами; 2 – одним контуром

**Рисунок 6 - Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента**

### ВИСНОВКИ

Вдосконалена модель ультразвукового первинного перетворювача, яка представлена у вигляді електричної схеми-аналога і полягає в урахуванні демпфувальних параметрів коливання п'єзопластини та наявності серії бічних резонансних частот. Це дає можливість більш точно враховувати вплив амплітудно-частотної характеристики акустичного тракту на ультразвуковий сигнал, підвищити точність визначення його параметрів.

1. Лютак І. З. Дослідження імпульсного режиму роботи ультразвукового перетворювача / І. З. Лютак, І. С. Кісіль // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2003. – №1. – С. 42 – 45. 2. Домаркас В. Й. Ультразвуковая эхоскопия / В. Й. Домаркас, Э. Л. Пилецкас. – Л.: *Машиностроение*, 1972. – №3. – С. 45–52. 3. Касаткин Б. А. Об одном способе перестройки рабочей частоты пьезопреобразователя / Б. А. Касаткин, Н. Я. Павин // *Дефектоскопия*. – 1980. – №1. – С. 17 – 21. 4. Гитис М. Б. Применение теоремы об эквивалентном генераторе для расчета прямых пьезоэлектрических преобразователей / М. Б. Гитис, В. А. Чуприн // *Дефектоскопия*. – 1987. – №1. – С. 9 – 14. 5. Мельканович А. Ф.

*Исследование спектральных и временных характеристик информативных сигналов ультразвуковых дефектоскопов / А. Ф. Мельканович, Л. М. Куликулей, И. И. Арбит // Дефектоскопия*. – 1986. – №5. – С. 11 – 18. 6. *Физическая акустика: т. 1. / Н. Мезон*. – М.: Мир, 1966 – 592 с. 7. Петров П.Н. *Акустика. Электроакустические преобразователи: учебн. пособие / П. Н. Петров*. – СПб.: СПбГУАП, 2003. – 80 с.

**Поступила в редакцію 08.12.2009р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Заміховський Л. М.**