ISSN 1993-9981 Методи та прилади контролю якості, № 23, 2009

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 тракті 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.

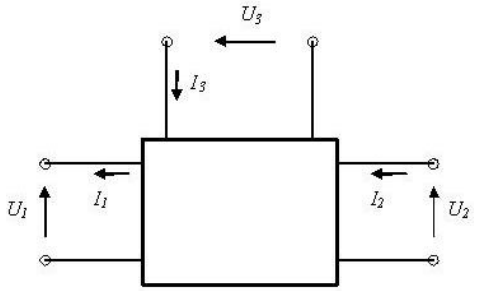
The approach to account of decibel-log frequency characteristic of cues of defect scopes is observed. The transient phenomenon design technique in an electro acoustical section of a defect scope in emanation and reception regimes is presented. The estimation of convergence of the received decibel-log 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 шестиполюсника, в якому одному входу відповідає електрична складова, а двом іншим – дві поверхні п'єзопластини (рис. 1).



U_1, U_2 – напруги шестиполюсника, що відповідають силі деформації чутливого елемента; I_1, I_2 – струми шестиполюсника, 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 шестиполюсника

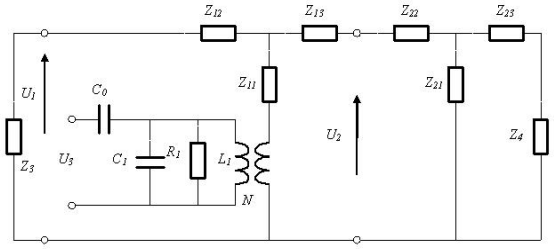
Розкриття електричної схеми-аналога чутливого елемента здійснено Н. Мезоном [6], при якому процес утворення коливання чутливого елемента внаслідок подавання електричного імпульсу на електроди представляється коливальним контуром паралельно з'єднаних конденсатора та котушки індуктивності. Більш удосконалену схему-аналог роботи чутливого елементу 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 елементу обчислюється так [7]:

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

де A – площа поверхні чутливого елемента, L – товщина чутливого елемента, ε^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]:

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

де k_T – коефіцієнт п'єзоелектричного зв'язку, ω – 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:

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

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:

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

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

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

де Z_c – акустичний імпеданс п'єзопластини, β_a – константа поширення акустичної хвилі в п'єзоматеріалі, ρ – 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:

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

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

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

де Z_{csh} – акустичний імпеданс проміжного шару, β_{ash} – константа поширення акустичної хвилі в проміжному шарі, ρ_{sh} – густина проміжного шару, ω – 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:

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

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_1 показані на рис. 4. Напруга визначалась на виході проміжного шару та на вході в матеріал досліджуваного об'єкта (Z_4).

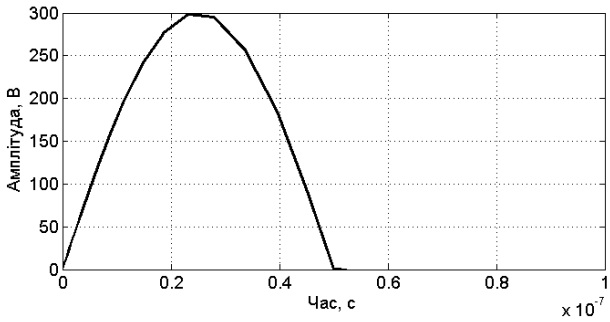


Рисунок 3 - Збуджуючий імпульс генератора напруги чутливого елемента

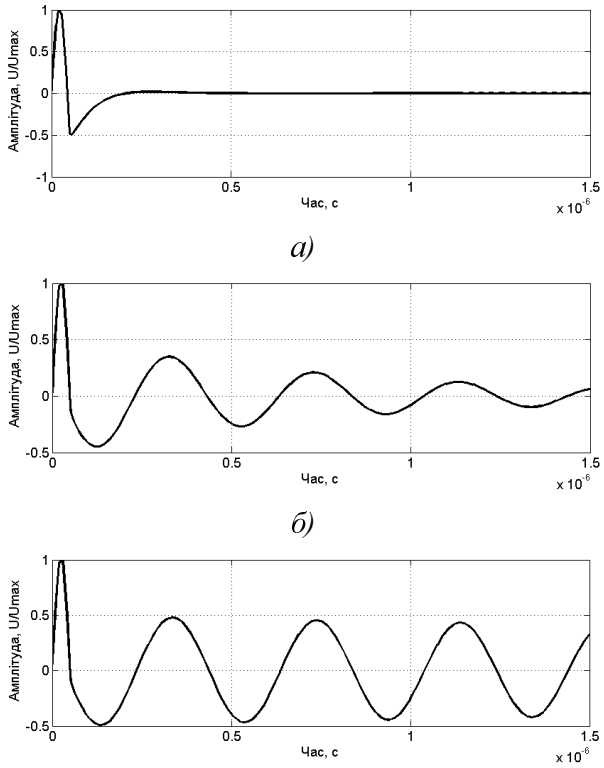
Таблиця 1 - Вхідні параметри проведення розрахунку чутливого елемента

Назва параметра	Значення
L, м	$7{,}6\cdot10^{-4}$
Радіус п'єзопластини, м	$2{,}5\cdot10^{-3}$
Частота, МГц	2,5
ρ, кг/м^3	7,75
e, Кл/м^2	15,8
c^D, Н/м^2	$14{,}7\cdot10^{10}$
k_T	0,49
ρ_{sh}, кг/м^3	1190
c_{lsh}, м/с	2700
L_{sh}, м	$6{,}802\cdot10^{-3}$
Густина сталі, кг/м^3	7,85
Швидкість поздовжньої ультразвукової хвилі в сталі, м/с	5900

Як можна побачити із рис. 4, опір R_1 вносить зміни у робочу частоту коливання чутливого елемента. При малому значенні опору R_1 (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 зондуючий 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_l = 25 Ом; б)– R_l = 250 Ом; в) – R_l = 2500 Ом

Рисунок 4 - Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елемента

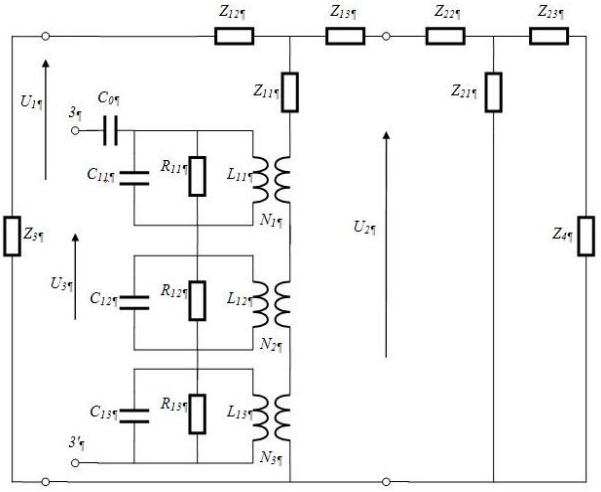


Рисунок 5 - Електрична схема-аналог чутливого елемента ультразвукового первинного перетворювача

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

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

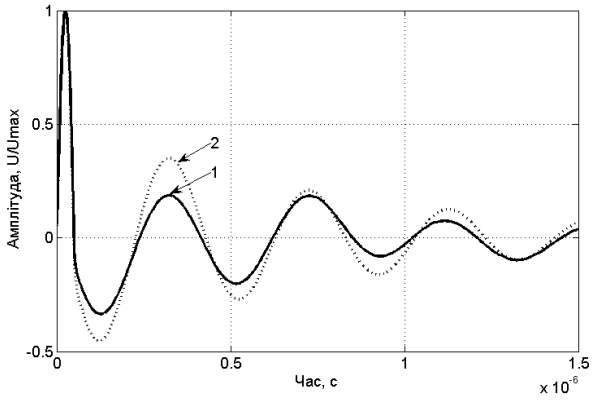
$$Z_3 = \frac{1}{j\omega C_0}\left[1 - \sum_n k^2_{eff,n} + \sum_n \frac{j\omega k^2_{eff,n}}{\left(\omega^2_{0n} - \omega^2\right)C_0}\right] = \tag{7}$$

$$= \frac{1-k_T^2}{j\omega C_0} + \sum_n \frac{j\omega k^2_{eff,n}}{\left(\omega^2_{0n} - \omega^2\right)C_0}$$

– для спрощення опір Z_3 можна визначити так:

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

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-сингалу.



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

Рисунок 6 - Форма ультразвукового сигналу на виході із чутливого елементу

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 пъезопреобразователя/ Б. А. Касаткин, Н. Я. Павин // Дефектоскопия. – 1980. – №1. – С. 17 – 21. 4. Гитис М. Б. Применение теоремы об эквивалентном генераторе для расчета прямых пъезоелектрических преобразователей / М. Б. Гитис, В. А. Чуприн // Дефектоскопия. – 1987. – №1. – С. 9 – 14. 5. Мелькановіч А. Ф. Исследование спектральных и временных характеристик информативных сигналов ультразвуковых дефектоскопов / А. Ф. Мелькановіч, Л. М. Кушкулей, 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.