

УДК621.376.33

С.Р. Зиборов, доцент, канд. техн. наук,**С.А. Азаренок, магистр***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053,**E-mail: sergey.ziborov@gmail.com***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Рассмотрен полуэмпирический метод определения эквивалентных электрических параметров ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя.

Ключевые слова: пьезоэлектрический преобразователь, эквивалентные параметры.

При разработке ультразвуковых устройств возникает необходимость в определении эквивалентных электрических параметров пьезоэлектрических преобразователей, которые используются в качестве источников и приемников ультразвука в частотном диапазоне от 40 до 250 кГц. Однако в технических описаниях таких преобразователей, как правило, указывается только их статическая емкость, измеренная на частоте $F = 1$ кГц.

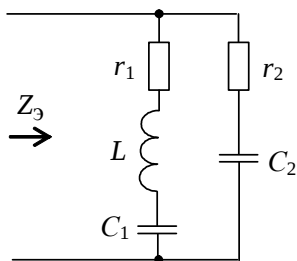


Рисунок 1 — Эквивалентная схема преобразователя

Целью данной статьи является разработка метода расчета электрических параметров пьезоэлектрического преобразователя с использованием паспортных и экспериментальных данных.

Пьезоэлектрический преобразователь обычно представляют в виде эквивалентной электрической схемы Баттерворта-Ван Дейка (рисунок 1), которая справедлива для маломощных ультразвуковых преобразователей с высокой механической добротностью [1, 2]. Индуктивно-емкостная ветвь r_1, L, C_1 схемы, учитывает свойства непосредственно пьезоэлектрического резонатора и представляет собой последовательный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_{p1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}. \quad (1)$$

Емкость C_2 преобразователя учитывает статическую емкость пьезоэлектрического резонатора, а также паразитную емкость механических деталей, предназначенных для крепления резонатора. Сопротивления r_1, r_2 учитывают потери, вносимые преобразователем.

В целом эквивалентную схему (рисунок 1) можно рассматривать как параллельный колебательный контур с резонансной частотой

$$f_{p2} = \frac{\sqrt{C_1 + C_2}}{2\pi\sqrt{LC_1C_2}}. \quad (2)$$

В технической литературе частоту f_{p1} , соответствующую последовательному резонансу, называют частотой резонанса, а частоту f_{p2} , соответствующую параллельному резонансу, — частотой антирезонанса.

Паспортную емкость преобразователя, измеренную на низкой частоте $F \ll f_{p1}$, можно считать равной

$$C \approx C_1 + C_2, \quad (3)$$

поскольку практически можно пренебречь влиянием индуктивности L .

Поделив (2) на (1) с учетом (3), получим пропорцию

$$\frac{f_{p2}}{f_{p1}} = \frac{\sqrt{C}}{\sqrt{C_2}},$$

решив которую относительно C_2 , получим

$$C_2 = C \left(\frac{f_{p1}}{f_{p2}} \right)^2. \quad (4)$$

Из (4) следует, что, зная емкость C и резонансные частоты f_{p1} , f_{p2} , можно рассчитать емкость C_2 , а затем, используя формулу (3), определить эквивалентную емкость пьезоэлектрического резонатора

$$C_1 = C - C_2. \quad (5)$$

Тогда с учетом (1) можно найти эквивалентную индуктивность пьезоэлектрического резонатора по формуле

$$L = \frac{1}{(2\pi f_{p1})^2 C_1}. \quad (6)$$

Для определения сопротивлений r_1 и r_2 , проанализируем модуль полного сопротивления пьезоэлектрического преобразователя на произвольной частоте f

$$|Z(f)| = r + jx = \frac{|r_1 + jx_1||r_2 + jx_2|}{|r_1 + r_2 + j(x_1 + x_2)|} = \sqrt{\frac{r_1^2 r_2^2 + x_1^2 r_2^2 + r_1^2 x_2^2 + x_1^2 x_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}}, \quad (7)$$

где r и x — активная и реактивная составляющие полного сопротивления; $x_1 = 2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC_1}$ и $x_2 = -1/2\pi fC_2$ — реактивные сопротивления ветвей эквивалентной схемы преобразователя (рисунок 1).

На частоте f_{p1} последовательного резонанса $x_1 = 0$ и выражение (7) принимает вид

$$|Z(f_{p1})| = \sqrt{\frac{r_1^2 r_2^2 + r_1^2 x_2^2}{(r_1 + r_2)^2 + x_2^2}} = r_1 \sqrt{\frac{1 + (2\pi f_{p1} r_2 C_2)^2}{1 + [2\pi f_{p1} (r_1 + r_2) C_2]^2}}. \quad (8)$$

На частоте f_{p2} параллельного резонанса $x_1 + x_2 = 0$, откуда получаем

$$|x_1| = |x_2| = \frac{1}{2\pi f_{p2} C_2}.$$

При этом модуль полного сопротивления (7) принимает вид

$$|Z(f_{p2})| = \frac{\sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 (2\pi f_{p2} C_2)^4 + (2\pi f_{p2} C_2)^2 (r_2^2 + r_1^2)}}{(2\pi f_{p2} C_2)^2 (r_1 + r_2)}. \quad (9)$$

Формулы (8), (9) можно объединить в систему уравнений:

$$\begin{cases} |Z(f_{p1})| = r_1 \sqrt{\frac{1 + (2\pi f_{p1} r_2 C_2)^2}{1 + [2\pi f_{p1} (r_1 + r_2) C_2]^2}}; \\ |Z(f_{p2})| = \frac{\sqrt{1 + r_1^2 r_2^2 (2\pi f_{p2} C_2)^4 + (2\pi f_{p2} C_2)^2 (r_2^2 + r_1^2)}}{(2\pi f_{p2} C_2)^2 (r_1 + r_2)}, \end{cases} \quad (10)$$

решив которую, можно рассчитать сопротивления r_1 и r_2 , если известны значения всех остальных величин.

Для пьезоэлектрических преобразователей с высокой добротностью характерно то, что на частотах резонанса и антирезонанса сопротивление преобразователя является активным:

$$\begin{cases} Z(f_{p1}) \approx r(f_{p1}); \\ Z(f_{p2}) \approx r(f_{p2}). \end{cases} \quad (11)$$

С целью проверки правильности предложенного метода расчета параметров пьезоэлектрического преобразователя, была собрана лабораторная установка, структурная схема которой изображена на рисунке 2.

Генератор стандартных сигналов Γ вырабатывает гармоническое напряжение, которое подается на делитель напряжения,

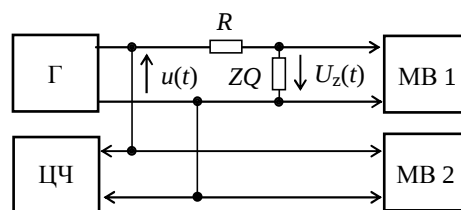


Рисунок 2 – Структурная схема лабораторной установки

состоящий из резистора R и пьезоэлектрического преобразователя ZQ . Все эксперименты были выполнены с использованием ультразвукового пьезоэлектрического преобразователя EC4016 фирмы Sencera. Частота настройки генератора контролировалась цифровым частотомером ЦЧ. Входное и выходное напряжения делителя напряжения измерялись с помощью милливольтметров MB1 и MB2.

С помощью установки (рисунок 2) была измерена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) делителя напряжения

$$K(f) = \frac{|\dot{U}_z|}{|\dot{U}|} = \frac{|Z(f)|}{|R + Z(f)|}, \quad (11)$$

показанная на рисунке 3.

Из рисунка 3 видно, что минимум и максимум АЧХ, отмеченные точками A и B, соответствуют последовательному и параллельному резонансам пьезоэлектрического преобразователя на частотах $f_{p1} = 39,5$ кГц и $f_{p2} = 41,1$ кГц соответственно.

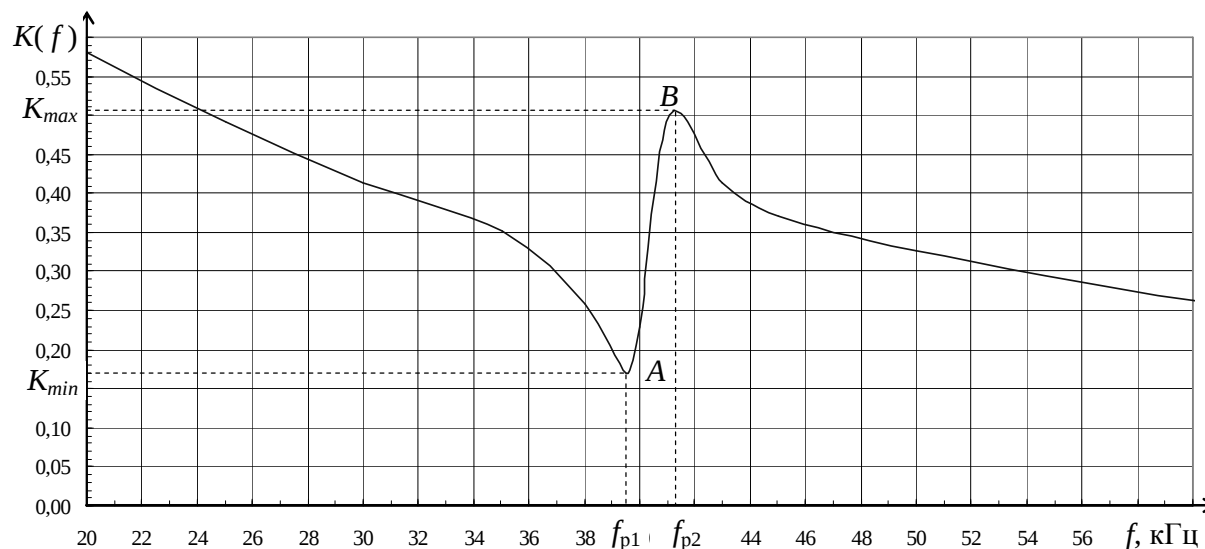


Рисунок 3 – Экспериментально измеренная АЧХ делителя напряжения

Знание экстремальных значений АЧХ $K_{\min}$ и $K_{\max}$ позволяет рассчитать модуль полного сопротивления пьезоэлектрического преобразователя на частотах резонанса f_{p1} и антирезонанса f_{p2} с учетом выполнения условий (11) соответственно по формулам:

$$|Z(f_{p1})| \approx \frac{R_0 K_{\min}}{1 - K_{\min}};$$

$$|Z(f_{p2})| \approx \frac{R_0 K_{\max}}{1 - K_{\max}}.$$

В результате были найдено, что $|Z(f_{p1})| = 1024$ Ом, а $|Z(f_{p2})| = 5000$ Ом. Полная емкость преобразователя, измеренная на частоте 1 кГц с помощью цифрового мультиметра, оказалась равной $C = 1740$ пФ. С учетом значений частот f_{p1} и f_{p2} были рассчитаны по формулам (4), (5) и (6) значения следующих величин: $C_1 = 1607$ пФ, $C_2 = 133$ пФ и $L = 122$ мГн. Система уравнений (10) была решена с помощью программы Mathcad и получены следующие значения сопротивлений потерь $r_1 = 1150$ Ом и $r_2 = 139$ Ом.

С учетом рассчитанных параметров была составлена и проанализирована с помощью программы Micro-Cap модель эквивалентной схемы пьезоэлектрического преобразователя (рисунок 4), учитывающая влияние входной емкости измерительных приборов, подключаемых к преобразователю. На рисунке 5 показана АЧХ модели (рисунок 4). Сравнивая рисунки 3 и 5, видно, что в окрестности частот резонанса и антирезонанса отклонение АЧХ модели от экспериментально измеренной АЧХ не превышает 10 %, что вполне приемлемо для инженерных расчетов.

Предложенная методика определения эквивалентных электрических параметров пьезоэлектрического преобразователя была использована при разработке ультразвукового измерителя объема жидких материалов, содержащихся в резервуаре.



Рисунок 4 – Модель схемы пьезоэлектрического преобразователя

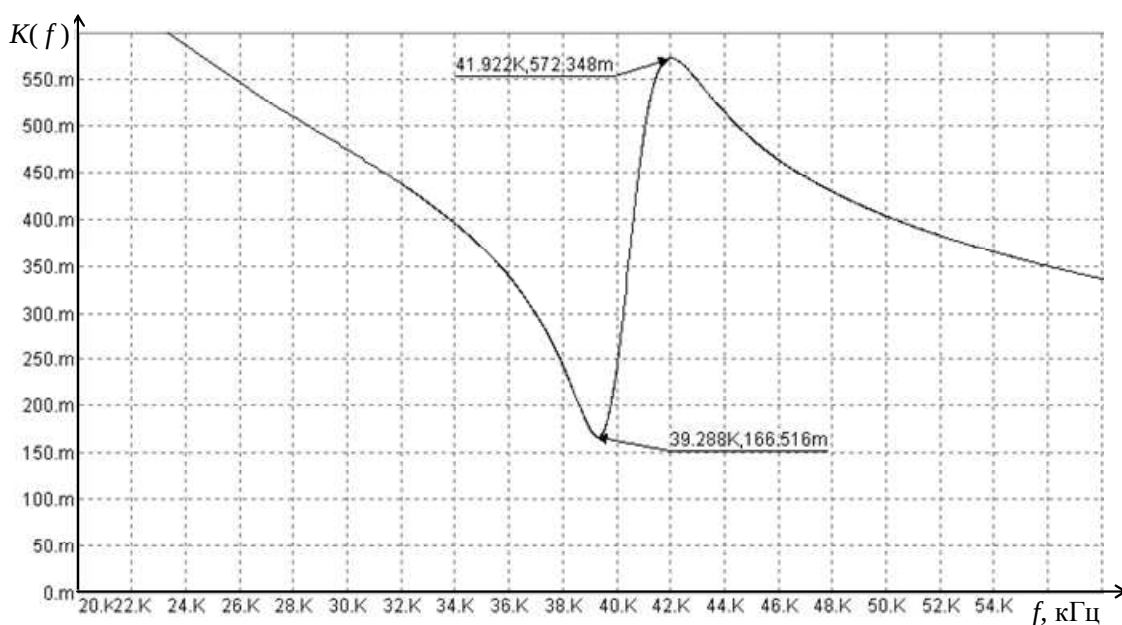


Рисунок 5 – АЧХ модели пьезоэлектрического преобразователя

В дальнейшем предполагается разработка методики расчета эквивалентных электрических параметров пьезоэлектрического преобразователя, определяющих его поведение в окрестности частот, кратных частотам резонанса и антирезонанса.

Библиографический список

1. Филатов Г.А. Малогабаритные низкочастотные механические фильтры / Г.А. Филатов, Е.Ф. Баев, В.С. Цымбалюк. — М.: Связь, 1974. — 264 с.
2. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден // Перевод с англ. Ю.А. Заболотной. Под ред. Е.Л. Свинцова. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с.

Поступила в редакцию 05.05.2009 г.