

УДК 621.791.16

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА И МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ
ДЛЯ МИКРОСВАРКИ ПРОВОЛОЧНЫХ ВЫВОДОВ**

Д. т. н. В. Л. Ланин¹, Г. Ф. Ковальчук², И. Б. Петухов², С. Б. Школык²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²КБТЭМ-СО

Беларусь, г. Минск

petuchov@kbtm.by

Проведен сравнительный анализ расчета резонансной частоты ультразвукового преобразователя для микросварки проволочных выводов и результатов моделирования резонансной частоты и импеданса ультразвуковых преобразователей в программной среде PZFlex. Установлено хорошее совпадение результатов моделирования и параметров изготовленных пьезокерамических излучателей.

Ключевые слова: ультразвуковой преобразователь, пьезоизлучатель, ультразвуковая микросварка, проволочные выводы, импеданс, частота резонанса.

В современных установках проволочного монтажа ультразвуковая система, состоящая из ультразвукового генератора и ультразвукового преобразователя играет ключевую роль в достижении качества сварных соединений. О качестве ультразвукового преобразователя можно судить по таким параметрам как стабильность частоты резонанса в процессе эксплуатации, импеданс на резонансной частоте и форма частотных зависимостей модуля и фазы импеданса преобразователя. Современный ультразвуковой пьезокерамический преобразователь для установок микросварки характеризуется импедансом 10—30 Ом на резонансной частоте, которая находится в диапазоне от 60 до 240 кГц. Ультразвуковые преобразователи повышенной частоты (с частотой резонанса более 100 кГц) используются преимущественно в установках термовзвучковой сварки методом «шарик-клин» и позволяют повысить производительность за счет сокращения времени сварки, а также уменьшить температуру зоны сварки. Наибольшую трудность при разработке ультразвукового преобразователя представляет расчет и оптимизация конструкции пьезокерамического излучателя, состоящего из четырех или шести пьезокерамических колец, электрически соединенных параллельно с помощью электродов из медной фольги толщиной 0,05 мм, и стянутых между собой двумя металлическими накладками. Стяжка пьезокерамических колец металлическими накладками производится посредством специальной шпильки с нарезанной резьбой или с помощью стягивающего болта (рис. 1).

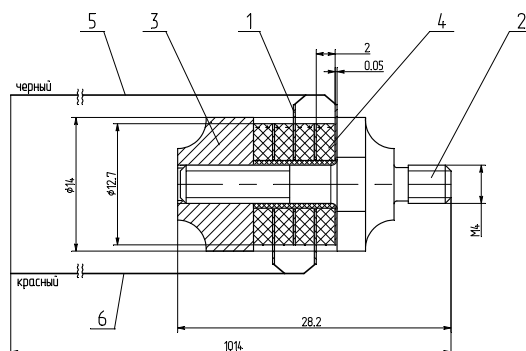


Рис. 1. Пьезокерамический излучатель:

1 — медные электроды; 2 — шпилька с передней накладкой; 3 — задняя накладка, 4 — пьезокерамические кольца, 5, 6 — выводы для подвода переменного электрического напряжения

Расчет пьезокерамического излучателя основан на решении дифференциальных уравнений распространения упругих волн в твердом теле, а именно в металлических стягивающих накладках пьезоизлучателя, и на решении уравнений пьезоэффекта [1]. На основе решения уравнений получают зависимости распределения силы, скорости и амплитуды колебаний вдоль всех составных частей пьезоизлучателя. Далее, используя метод электромеханических аналогий «напряжение—сила» и «ток—скорость» [2], строится электрическая эквивалентная схема пьезокерамического излучателя (рис. 2).

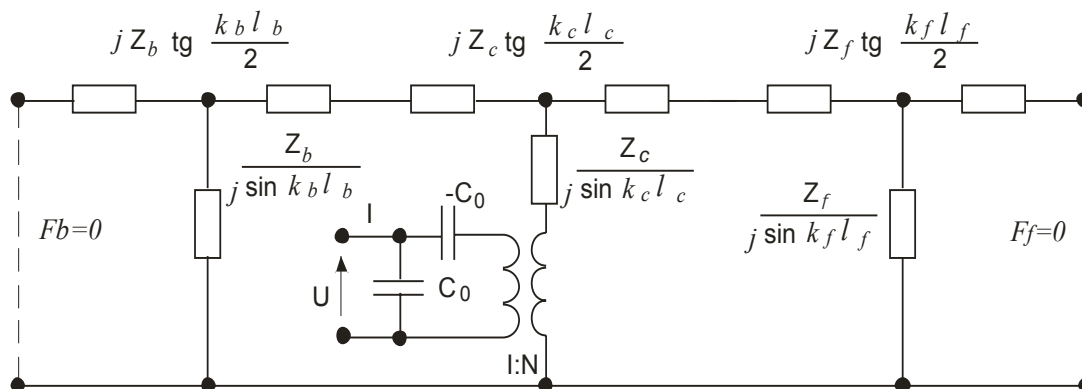


Рис. 2. Эквивалентная схема пьезокерамического излучателя

При гармонических колебаниях с учетом сдвига фаз импеданс пьезоизлучателя имеет активную и реактивную компоненты: реактивная составляющая приводит к изменению частоты резонанса, активная составляющая связана со снижением амплитуды колебательной скорости. Частоты, на которых реактивная составляющая импеданса обращается в нуль, являются резонансными частотами. После построения эквивалентной схемы преобразователя и определения по ней комплексного импеданса можно определить его резонансную частоту из условия нулевого комплексного импеданса [3]:

$$\frac{\omega l_2}{c_2} + \arctg\left(\frac{\rho_1 A_1 c_1}{\rho_2 A_2 c_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_1}{c_1}\right) + \arctg\left(\frac{\rho_3 A_3 c_3}{\rho_2 A_2 c_2} \operatorname{tg} \frac{\omega l_3}{c_3}\right) = p. \quad (1)$$

В формуле (1) приняты следующие обозначения:

- l_1, l_2 и l_3 — длина (толщина) задней накладки, пьезокерамики и передней накладки соответственно;
- ρ_1, ρ_2 и ρ_3 — плотности задней накладки, пьезокерамики и передней накладки соответственно;
- c_1, c_2 и c_3 — скорость звука задней накладки, пьезокерамики и передней накладки соответственно;
- A_1, A_2 и A_3 — площадь поперечного сечения задней накладки, пьезокерамики и передней накладки соответственно;
- ω — круговая частота механического резонанса.

Измерения резонансной частоты изготовленных пьезоэлектрических излучателей, рассчитанных по формуле (1), показали, что отклонение частоты от расчетной — не более 10%, что вполне приемлемо для практического использования. Расчеты по формуле (1) можно проводить в математическом пакете MathCAD. Однако такой подход при разработке пьезоизлучателей не учитывает различные моды колебаний, которые могут возникать при определенных соотношениях геометрических размеров составных частей пьезоизлучателя. К таким модам колебаний (чаще нежелательным) относятся, например, поперечные и крутильные колебания, которые, распространяясь по волноводу ультразвукового преобразователя к рабочему микроинструменту, могут вызвать сложный характер колебаний его рабочего торца, что в свою очередь может сказаться на качестве сварных соединений. Эта проблема больше всего проявляется при разработке ультразвуковых преобразователей повышенной частоты (более 100 кГц), т. к. приходится использовать составляющие компоненты пьезоизлучателя меньших геометрических размеров.

Среди немногочисленных программных комплексов для расчета пьезоизлучателей был выбран для тестирования САПР PZFlex компании Weidlinger Associates Inc. [4]. Программа позволяет рассчитывать и анализировать практически все известные конструкции ультразвуковых преобразователей с использованием библиотеки материалов программы, а также создавать собственные. На рис. 3 показано рабочее окно ввода параметров пьезоизлучателя, на рис. 4 и 5 — выходные параметры.

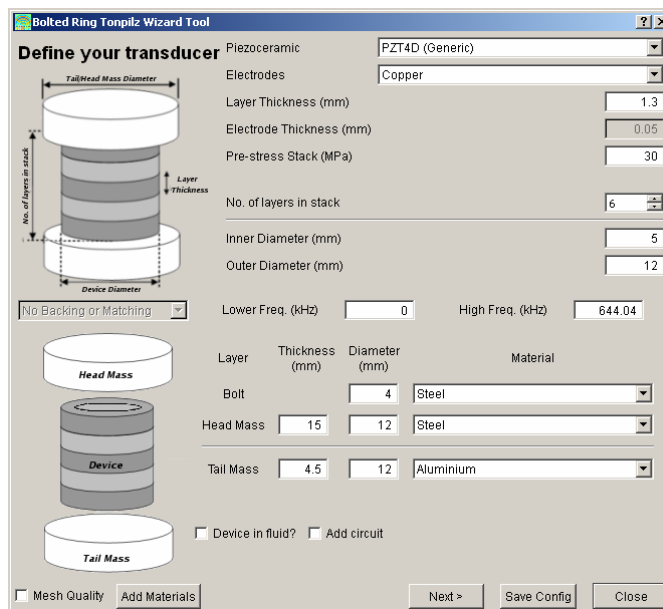


Рис. 3. Окно ввода исходных параметров пьезоизлучателя

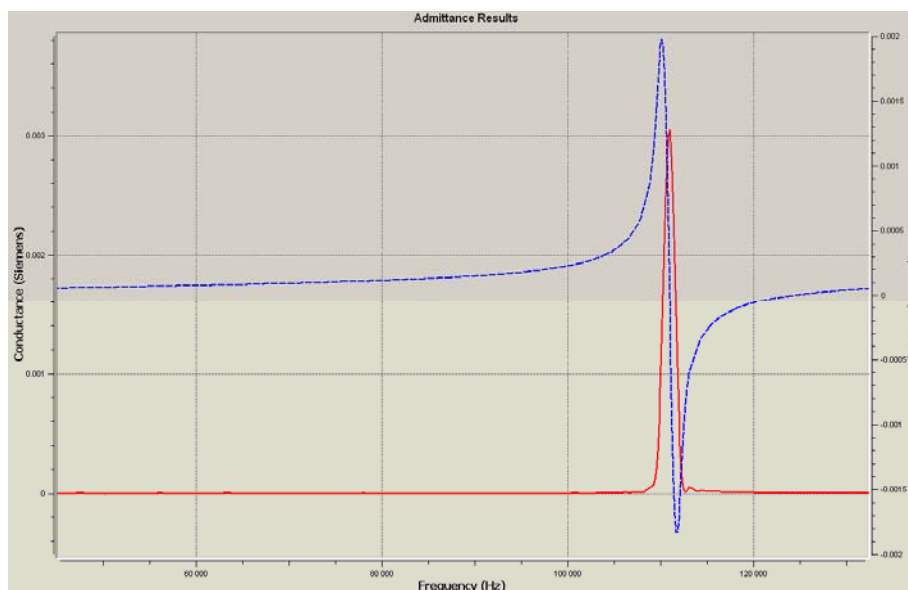


Рис. 4. Окно фазочастотной характеристики и проводимости пьезоизлучателя

Расчетная резонансная частота пьезоизлучателя составила около 110,8 кГц. Максимальная амплитуда из рис. 5 также максимальна на этой частоте. Для определения характера колебаний (продольные или поперечные) есть возможность проверить в режиме контроля формы колебаний.

Расчеты в программе PZFlex основаны на методе конечных элементов, и возможности для анализа обширны. Для оценки точности расчетов был промоделирован, а затем изготовлен пьезоизлучатель на частоту резонанса 50 кГц. Измеренная резонансная частота изготовленного пьезоизлучателя составила 48,9 кГц, что дает отклонение менее 3%.

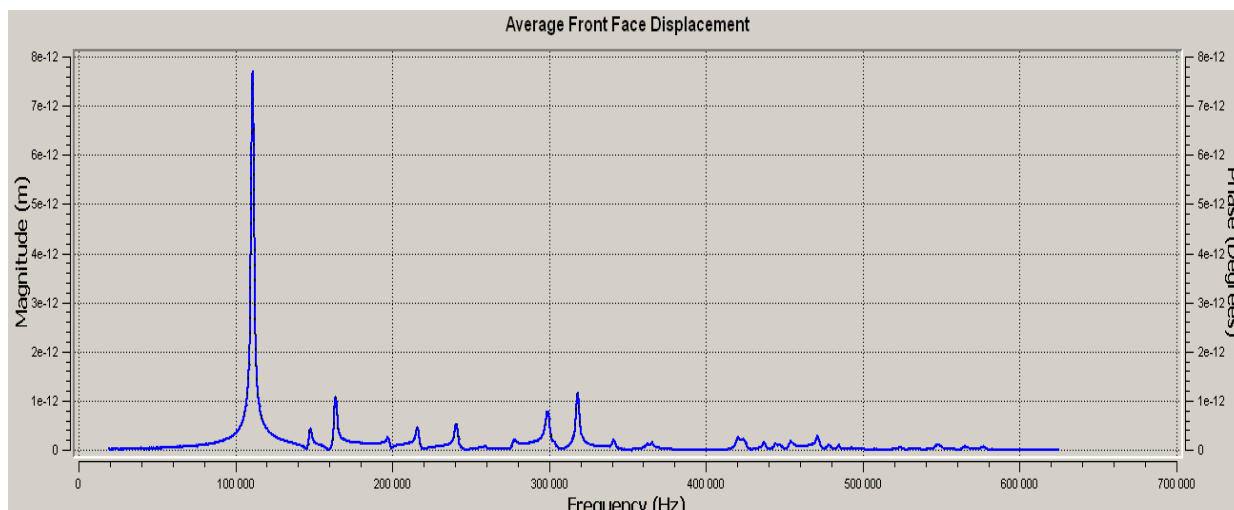


Рис. 5. Окно амплитудно-частотной характеристики пьезоизлучателя

Таким образом, программа PZFlex является уникальным инструментом для расчета и моделирования пьезоэлектрических излучателей.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Предложенная методика расчета пригодна для практического использования, отклонение резонансной частоты изготовленных пьезоизлучателей от расчетной не превышала 10%.

2. Для разработки ультразвуковых преобразователей установок микросварки желательно использовать программные комплексы типа PZFlex, позволяющие не только достигнуть более высокую точность, но и получить спектр возможных колебаний.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Мэзон У. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуке.— Москва: Издательство иностранной литературы, 1952.

2. Донской А. В., Келлер О. К., Кратыш Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки.— Ленинград: Энергоиздат, 1982.— С. 50—71.

3. Fry W. J., Taylor J. M., Hennis B. W. Design of crystal vibrating systems.— N. Y.: Dover publications Inc., 1948.— P. 163—164.

4. [http:// www.pzflex.com](http://www.pzflex.com)

V. L. Lanin, G. F. Kovalchuk, I. B. Petuchov, S. B. Shkolyk

Calculation and modelling of piezoceramic transducers for ultrasonic convertes for lead wires microwelding.

A comparative analysis of the calculation of the resonance frequency of the ultrasonic transducer for wire leads microwelding and the simulation results on the resonance frequency and impedance of ultrasonic transducers in PZFlex software environment. A good agreement has been found between simulation results and the parameters of the manufactured piezoceramic converters.

Keywords: *ultrasonic transducer, piezoelectric converter, ultrasound microwelding, lead wire, impedance, resonance frequency.*