

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КАВИТИРУЮЩИХ СРЕД

**Р.В. Барсуков, В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Е.В. Ильченко,  
Д.С. Абраменко, А.В. Шалунов**

Бийский технологический институт (филиал)  
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
г. Бийск

В работе установлены зависимости между параметрами обрабатываемых технологических средств и измеряемыми параметрами пьезоэлектрических колебательных систем.

**Ключевые слова:** Пьезоэлектрический преобразователь, ультразвук, кавитирующие среды.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных направлений развития современных высокотехнологических производств является применение ультразвуковых (УЗ) технологий, обеспечивающих интенсификацию процессов и получение новых материалов. Скорость реализации ультразвуковых технологий и качество конечного продукта определяются эффективностью ультразвукового воздействия. В связи с этим возникает необходимость непрерывного контроля обрабатываемых ультразвуком сред для оптимизации протекания процесса (создания оптимального воздействия) и обеспечения заданного качества конечного продукта.

### ОПИСАНИЕ РЕШАЕМОЙ ЗАДАЧИ

Для обеспечения оптимального введения ультразвуковой энергии в обрабатываемую среду необходимо выполнение условия согласования ультразвукового генератора с ультразвуковой колебательной системой (УЗКС) и ее согласование с обрабатываемыми средами. Согласование на участке УЗКС – обрабатываемая среда выполняется на этапе проектирования УЗКС. Для обеспечения согласования УЗКС с электронным генератором ультразвуковой частоты обычно используется следующая схема включения пьезоэлектрического преобразователя (рисунок 1) [3].

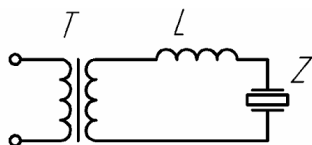


Рисунок 1 – Схема согласования УЗКС с выходом электронного генератора

Представленная схема содержит элемент  $Z$ , который представляет собой ультразвуковую колебательную систему, подверженную влиянию обрабатываемой технологической среды.

Для согласования преобразователя ультразвуковой колебательной системы с выходом генератора необходимо обеспечить работу УЗКС на резонансной частоте. При этом, выходное активное сопротивление генератора должно быть минимальным (согласование по напряжению), а реактивные емкостные составляющие колебательной системы должны компенсироваться реактивными индуктивными составляющими выходного каскада генератора.

$$\begin{cases} a_G \ll a_{УЗКС} \\ |b_G| = |b_{УЗКС}| \\ f = f_{резонанса} \end{cases}$$

Для выполнения этих условий последовательно с преобразователем колебательной системы включается дроссель с возможностью изменения его индуктивности (рисунок 2).

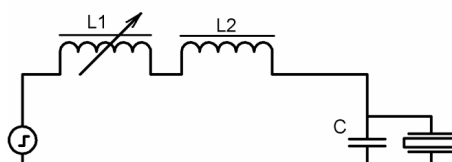


Рисунок 2 – Согласующий контур с перестраиваемым дросселем

Индуктивность регулируемого дросселя может быть выбрана исходя из значений

элементов эквивалентной схемы пьезоэлектрического преобразователя (рисунок 3).

Пьезоэлектрический преобразователь трансформирует энергию электрических колебаний в энергию механических колебаний. Система электромеханических аналогий позволяет рассматривать такое преобразование энергии как включение дополнительной комплексной нагрузки в электрическую цепь. Поэтому ток, протекающий через пьезоэлектрический преобразователь будет обусловлен двумя составляющими: током механической ветви и током электрической ветви. На рисунке 3 представлена эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя.

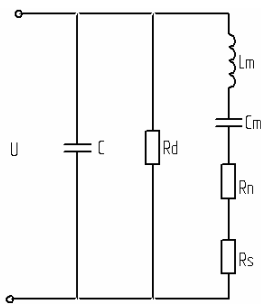


Рисунок 3 – Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС с пьезоэлектрическим преобразователем

Электрическая ветвь включает статическую емкость пьезокерамического преобразователя  $C$  и сопротивление диэлектрических потерь  $R_d$  (Рисунок 2).

Механическая ветвь содержит последовательно соединенные индуктивные, емкостные и активные элементы, определяемые свойствами обрабатываемой среды. Согласно существующим представлениям [1] индуктивность  $L_M$  эквивалентна колеблющейся массе преобразователя, емкость  $C_M$  – гибкости, активное сопротивление включает два слагаемых:  $R_P$  – соответствующее сопротивлению механических потерь;  $R_S$  – соответствующее сопротивлению излучения.

Таким образом, проведенный анализ эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС с пьезоэлектрическим преобразователем свидетельствует о возможности контроля параметров жидких сред путем измерения электрических параметров пьезопреобразователя.

Для проведения измерений параметров жидких сред, подверженных ультразвуковому воздействию, был разработан измерительный стенд. Структурная схема измерительного стенда представлена на рисунке 4.

Конструктивно стенд состоит из модуля выделения тока механической ветви  $I_m$  [3],  $F$  – канала измерения частоты,  $U_{tr}$  – канала измерения напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $T$  (рисунок 2),  $U_s$  – канала измерения напряжения на УЗКС,  $I_f$  – канала измерения полного тока, протекающего через УЗКС,  $\varphi$  – канала измерения фазового сдвига.

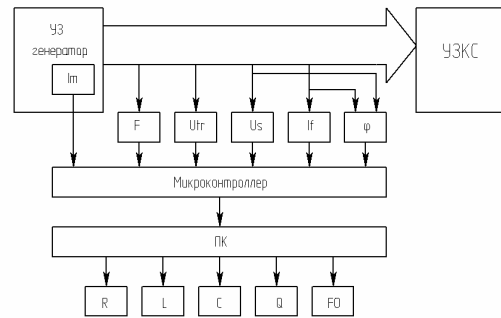


Рисунок 4 – Структурная схема измерительного стенда

При использовании схемы выделения тока механической ветви [3], получаемые значения оказываются пропорциональными току  $I_m$  и пригодными для построения АЧХ тока механической ветви, а также для дальнейшего вычисления добротности механического контура. Однако, для получения значений, эквивалентных электрическим величинам в единицах измерения СИ требуется знать абсолютное значение тока механической ветви, а также абсолютное значение напряжения на пьезоэлементах. С целью получения абсолютных значений указанных величин была проведена градуировка (калибровка) каналов измерения полного тока ( $I_f$ ), тока механической ветви ( $I_m$ ) напряжения на системе ( $U_s$ ) и напряжения на трансформаторе ( $U_{tr}$ ) измерительного стенда.

Для расчета параметров эквивалентной схемы были использованы следующие выражения:

$$R_M = \frac{U_{s0}}{I_{M0}}, \quad (1)$$

$$L_M = \frac{QR_M}{\omega_0} = \frac{QU_{s0}}{\omega_0 I_{M0}}, \quad (2)$$

$$C_M = \frac{1}{QR_M \omega_0} = \frac{I_{M0}}{Q\omega_0 U_{s0}}, \quad (3)$$

где  $I_{M0}$  – значение тока механической ветви на резонансе;  $U_{s0}$  – падение напряжения, на

пьезокерамическом преобразователе;  $Q$  – добротность системы;  $\omega_0$  – резонансная частота.

Для расчета значения добротности была использована АЧХ тока механической ветви, вид которой представлен на рисунке 5.

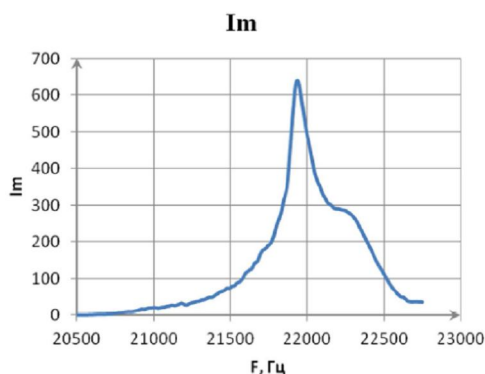


Рисунок 5 – АЧХ тока механической ветви

Добротность рассчитывается из выражения (4), связывающего ток, протекающий в колебательном контуре с током на резонансе и частотой [4]

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (4)$$

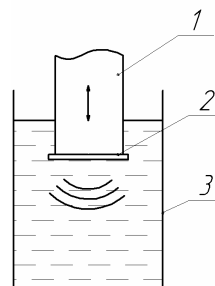
где  $\omega_0$  – резонансная частота;  $\omega$  – текущая частота;  $I_0$  – ток на резонансной частоте;  $I$  – ток на текущей частоте,  $Q$  – добротность контура, было получено выражение для добротности резонансного контура.

$$Q = \sqrt{\frac{\left( \frac{I_0}{I} \right)^2 - 1}{\left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}} \quad (5)$$

На практике такое выражение добротности оказывается более удобным, поскольку не требует построения полной АЧХ контура.

В качестве основы измерительного стенда был использован генератор ультразвукового аппарата Волна - 0.4/22 ОМ [5] с полуволновой ультразвуковой колебательной системой и рабочим окончанием с площадью излучения 176 мм<sup>2</sup>. В качестве исследуемых сред были использованы дистиллированная вода, ацетон, спирт, машинное масло. Измерения проводились при различных уровнях мощности УЗ воздействия, в различных технологических объемах.

Схема ультразвуковой обработки технологических сред в цилиндрических емкостях показана на рисунке 6.



Условные обозначения:  
1 – волновод-концентратор; 2 – рабочий инструмент; 3 – технологический объем.

Рисунок 6 – Размещение УЗ излучателя в объеме

Для каждой из выбранных жидкостей проводилось не менее 5 измерений на каждом из 6 уровней мощности.

На основе полученных экспериментальных данных, с использованием формул (2) (3) (4) были рассчитаны значения  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов эквивалентной электрической схемы УЗКС.

На рисунке 7 представлены зависимости активного сопротивления механической ветви от тока механической ветви  $I_m$ .

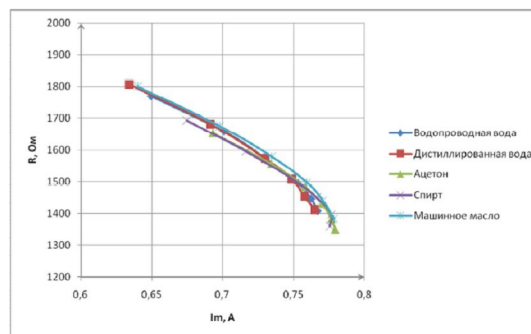


Рисунок 7 – Зависимость активного сопротивления механической ветви от тока механической ветви

Представленные зависимости имеют убывающий характер. Это свидетельствует о том, что с увеличением амплитуды колебаний поверхности рабочего инструмента, в среде происходит развитие кавитации, при этом степень затухания звуковых колебаний в обрабатываемой среде увеличивается, однако в противовес этому эффекту возникают явления отражения звука от формируемых вблизи рабочего инструмента парогазовых

пузырьков. В целом, свойства среды приближаются к свойствам воздушной среды, эквивалентное активное сопротивление которой ниже чем сопротивление жидкости.

Знание величины активного сопротивления эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС, диапазона его изменения, позволит на этапе настройки выполнить оптимальное согласование УЗКС с электронным генератором.

На рисунке 8 представлены зависимости индуктивной части импеданса механической ветви от тока механической ветви  $I_m$ .

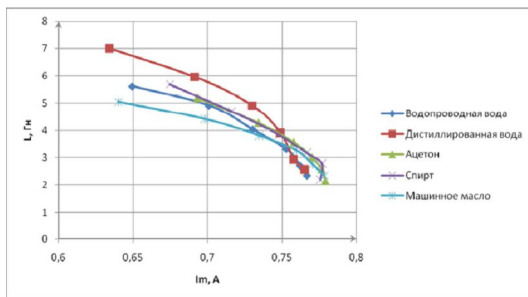


Рисунок 8 – Зависимость индуктивности механической ветви от тока механической ветви

Представленные на рисунке кривые имеют убывающий характер, что объясняется снижением плотности озвучиваемой среды, вследствие разрыхления ее парогазовыми пузырьками.

На рисунке 9 представлены графики зависимости емкостной части импеданса механической ветви от тока механической ветви

Возрастание емкостной составляющей также связано с развитием в среде степени кавитации и, как следствие, увеличением сжимаемости жидкости.

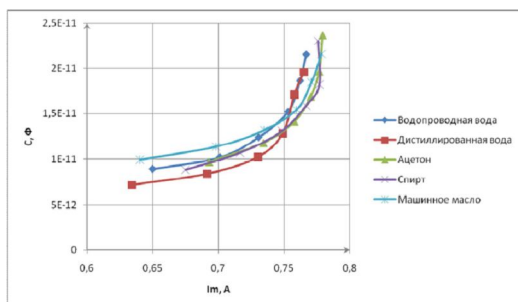


Рисунок 9 – Зависимость емкости механической ветви от тока механической ветви

Знание величины реактивных элементов эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС и диапазона их изменения позволяет, не только осуществить первоначальную настройку УЗ технологического ап-

парата на этапе отладки, но и обеспечивать его оптимальную настройку в процессе работы УЗ аппарата путем корректировки элементов цепей согласования [6] в случае изменения свойств обрабатываемых сред.

## ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили установить зависимости между параметрами обрабатываемых технологических сред и измеряемыми электрическими параметрами пьезоэлектрических колебательных систем. Предложенная и разработанная методика позволяет определять значения элементов эквивалентной схемы пьезоэлектрического преобразователя, необходимых для осуществления оптимального согласования пьезоэлектрического преобразователя с выходом генератора с учетом изменения характера и свойств кавитирующих технологических сред.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки [Текст] / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 208с, ил.
2. Khmelev, V.N. Method of Control Acoustic Load [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, E.V. Ilchenko // International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2011. – P.236–240.
3. Патент 2240073 Российская Федерация. Способ управления процессом ультразвуковой липосакции [Текст] / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В.; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – №2003107030
4. Зернов, Н.В Теория радиотехнических цепей [Текст] / Н.В. Зернов В.Г. Карпов – Л.: Энергия, 1965 – 892с,
5. Волна-М [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://u-sonic.ru/devices/volna>
6. Хмелев, В.Н Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2010. Т. 317. № 4. – С. 139–143.

**Барсуков Роман Владиславович** – к.т.н., доцент, тел.: (3854)432570, e-mail: [roman@bti.secsa.ru](mailto:roman@bti.secsa.ru); **Хмелев Владимир Николаевич** – д.т.н., профессор; **Генне Дмитрий Владимирович** – инженер; **Ильченко Евгений Владимирович** – аспирант; **Абраменко Денис Сергеевич** – к.т.н., доцент; **Шалунов Андрей Викторович** – к.т.н., доцент