

# Практические Исследования Возможностей Метода Косвенного Контроля Параметров Акустической Нагрузки

Владимир Н. Хмелев, Роман В. Барсуков, Дмитрий В. Генне, Денис С. Абраменко, Евгений В. Ильченко, Андрей В. Шалунов.

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского технического университета им. И.И. Ползунова.

**Аннотация** – Статья посвящена апробации метода косвенного контроля параметров акустической нагрузки. Представлены результаты измерения параметров акустической нагрузки.

**Ключевые слова** – Ультразвук, ультразвуковые генераторы, акустическая нагрузка, контроль.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные ультразвуковые электронные генераторы представляют собой устройства, преобразующие энергию электрической сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты, обеспечивающие выполнение дополнительных функций по обеспечению оптимального режима передачи энергии в обрабатываемые среды. Для создания универсальных УЗ генераторов, способных в автоматическом режиме обеспечивать максимально эффективное воздействие на различные технологические среды необходимо непрерывно получать информацию о физических свойствах обрабатываемых сред и использовать эту информацию для управления генератором и обеспечения оптимального режима работы.

Эффективность ввода ультразвуковых колебаний в обрабатываемую среду обеспечивается оптимальным согласованием элементов системы «генератор – УЗКС – обрабатываемая среда».

Согласование в системе «УЗКС – обрабатываемая среда» происходит на этапе проектирования УЗКС путем выбора типа и конструкции УЗКС. Согласование в системе «генератор – УЗКС» осуществляется на этапе настройки электронного генератора путем компенсации остаточных реактивных составляющих импеданса УЗКС на ее резонансной частоте и не учитывает дальнейших возможных изменений, обусловленных изменением режима работы, а также изменениями в самой колебательной системе и обрабатываемой среде.

При изменении свойств обрабатываемой среды происходит рассогласование системы «генератор – УЗКС – обрабатываемая среда» в следствии изменения акустического им-

педанса обрабатываемой среды. Наличие системы контроля параметров обрабатываемых сред позволит оптимизировать работу УЗ аппарата, повысить эффективность ввода акустической энергии в обрабатываемую среду за счет корректировки согласующих элементов и поддержания оптимального режима работы системы «генератор – УЗКС – обрабатываемая среда».

Поскольку ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) непосредственно контактируют с обрабатываемой средой, излучая в нее колебания, свойства УЗКС, такие как резонансная частота, механическая добротность, входной электрический импеданс, будут зависеть от свойств обрабатываемых сред. Тесная взаимосвязь параметров УЗКС и параметров технологических сред позволяет реализовать способ косвенного контроля параметров обрабатываемых сред, путем контроля параметров ультразвуковых колебательных систем. На рис. 1 представлена эквивалентная схема УЗКС с учетом элементов обуславливаемых нагрузкой ( $R_n$   $L_n$   $C_n$ ). Существующий метод [1], позволяет определять значение элементов эквивалентной электрической схемы УЗКС.

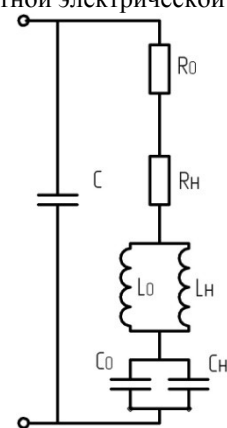


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС вблизи резонансной частоты

Предварительные эксперименты, по определению численных значений элементов рассматриваемой на рисунке 1 эквивалентной схемы, выявили некоторые недостатки предлагаемой методики измерений [1], которая предполагает вы-

числение значений параметров эквивалентной электрической схемы УЗКС, с использованием электрического напряжения снимаемого с пьезокерамических элементов УЗКС. Как показала практика это напряжение обусловлено реактивными составляющими согласующего контура и отличается от напряжения обеспечивающего ток через нагрузку (механическая ветвь колебательной системы).

На рисунке 2 представлена наиболее распространенная схема подключения пьезоэлектрического преобразователя к выходному каскаду генератора.

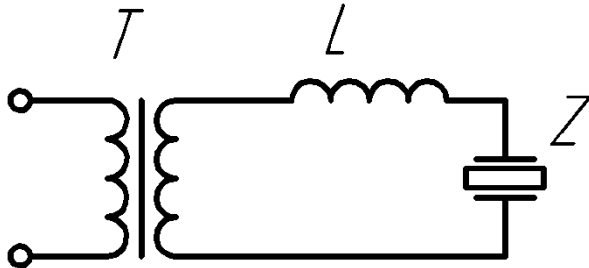


Рис. 2. Схема подключения пьезопреобразователя к генератору

Из типовой схемы подключения пьезопреобразователя к генератору рис. 2 следует что напряжение на пьезоэлементах УЗКС обусловлено наличием последовательного резонансного контура, образованного индуктивностью L и электрической емкостью пьезоэлементов. В процессе работы УЗ генератора напряжение на индуктивном элементе L по величине равно напряжению на пьезокерамических элементах Z, а по фазе сдвинуто на 180°. Поскольку напряжения на реактивных элементах образовавшегося электрического колебательного контура на резонансной частоте полностью компенсируют друг друга, то ток протекающий через колебательную систему обусловлен напряжением на вторичной обмотке трансформатора T [2]. Следовательно в расчетах необходимо использовать именно напряжение питания колебательного контура, так как именно оно является вынуждающей силой, совершающей полезную работу.

## II. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

С учетом замечаний, изложенных выше, для расчета элементов эквивалентной схемы УЗКС необходимо использовать следующие выражения:

$$U; I; Z;$$

где  $U$  и  $I$  напряжение на выходе трансформатора T и ток механической ветви, измеренные при работе УЗКС без нагрузки на резонансной частоте  $\omega$ .  $Z$  - добротность УЗКС при отсутствии акустической нагрузки (собственная добротность УЗКС).

$$U; I; Z; \omega;$$

где  $U$  и  $I$  - напряжение на выходе трансформатора T и ток механической ветви измеренные при работе УЗКС в режиме акустической нагрузки на резонансной частоте  $\omega$ .  $Z$  - добротность УЗКС измеренная в режиме акустической нагрузки.

## III. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для проведения исследования был разработан измерительный стенд, блок-схема которого представлена на рис. 3. Измерительный стенд состоит из ультразвукового генератора (управляемый выпрямитель, инвертор, согласующее звено, и управляемый генератор) и элементов измерительной схемы, позволяющих контролировать напряжение возбуждения LC контура и ток механической ветви УЗКС. Измерения проводились в процессе обработки различных жидких сред при различных уровнях ультразвукового воздействия.

В качестве основы измерительного стенда применялся генератор Волна 0.15/22 с полуволновой колебательной системой (площадь излучения рабочего окончания 4 см<sup>2</sup>).



Рис. 3. Блок схема измерительного стенда

В качестве обрабатываемых сред были выбраны моторное масло, оливковое масло, дистиллированная вода, этиленгликоль, спирт и силикон. Выбор обрабатываемых сред обусловлен различной вязкостью и кавитационной прочностью, кроме того, водные и спиртовые растворы представляют подавляющее большинство жидкостей для УЗ обработки.

Для каждой из выбранных жидкостей проводилось 10 измерений на каждом уровне мощности. На основе полученных экспериментальных данных были рассчитаны значения R, L, C элементов эквивалентной электрической схемы УЗКС, как при отсутствии акустической нагрузки, так и при ее наличии, а так же получены зависимости этих параметров от тока, потребляемого УЗКС, который в свою очередь пропорционально связан с амплитудой механических колебаний УЗКС.

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения значений параметров эквивалентной схемы, обусловленных свойствами самой колебательной системы, были проведены серия экспериментов в воздушной среде (работа в режиме холостого хода). Для используемой в стенде УЗКС эти параметры равны: R0=45 Ом; L0=0.5 Гн; C0=9.8\*10<sup>-11</sup> Ф.

Далее проводились эксперименты для каждой из выбранных акустических нагрузок результаты представлены на графиках рис. 4 – 6.

На рис. 4 представлены зависимости активного сопротивления механической ветви от тока протекающего по механической ветви.

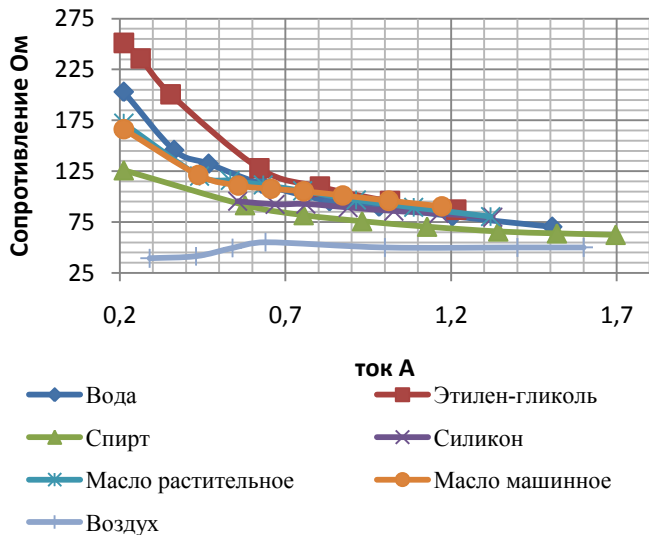


Рисунок 4 – Зависимость активной составляющей импеданса от тока

Из графиков видно, что при малых значениях тока механической ветви, когда реализуется в среде докавитационный режим, активное сопротивление механической ветви для различных сред сильно отличаются друг от друга, что обусловлено различными физическими свойствами обрабатываемых сред. Согласно системе электромеханических аналогий активная составляющая импеданса соответствует активным потерям в механической системе. Применительно к акустической нагрузке это как правило потери на внутреннее трение частиц.

С увеличением тока механической ветви (по мере развития в среде кавитации) активная составляющая импеданса уменьшается и стремится к одной величине, это связано с изменением свойств среды в следствии развития кавитации. Скорость изменения величины активного сопротивления механической ветви от тока механической ветви зависит от свойств обрабатываемой среды, а именно от ее кавитационной прочности. Уменьшение активного сопротивления по мере развития в среде кавитации обусловлено уменьшением степени выхода УЗ энергии в среду, из за экранирования излучающей поверхности разрастающимся кавитационным парогазовым облаком.

На рис. 5 и 6 представлены зависимости реактивных (индуктивной и емкостной) элементов механической ветви эквивалентной схемы УЗКС от тока механической ветви.

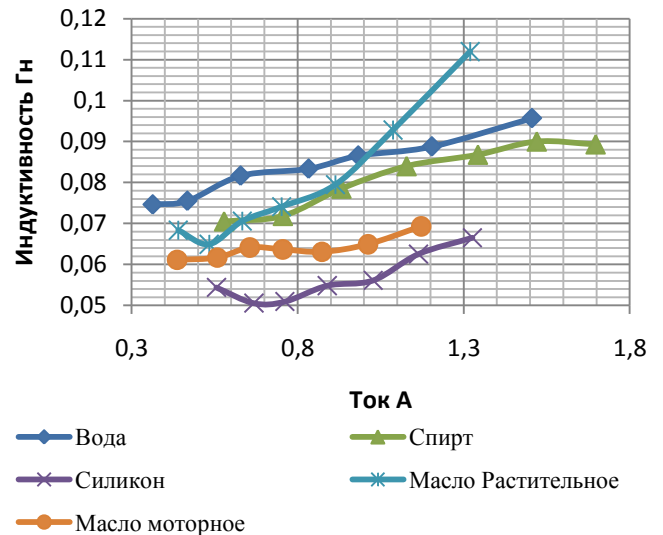


Рис. 5. Зависимость индуктивности от тока механической ветви

Из представленных на рисунке 5 зависимостей видно, что величина индуктивного элемента эквивалентной схемы увеличивается по мере роста тока механической ветви УЗКС, что связано с изменением реактивных (инерционных) составляющих акустического импеданса обрабатываемой среды.

Рост значения индуктивности (эквивалентной присоединенной массы) по мере увеличения тока механической ветви (амплитуды механических колебаний) очевидно связан с увеличением площади зоны излучения УЗКС (на малых амплитудах работает центральная часть рабочего инструмента, с увеличением амплитуды колебаний начинают работать периферийные зоны). Соответственно этот рост будет продолжаться пока площадь зоны излучения не достигнет величины площади рабочего инструмента.

На рис. 6 представлены зависимости электрической емкости механической ветви эквивалентной схемы УЗКС от тока механической ветви.

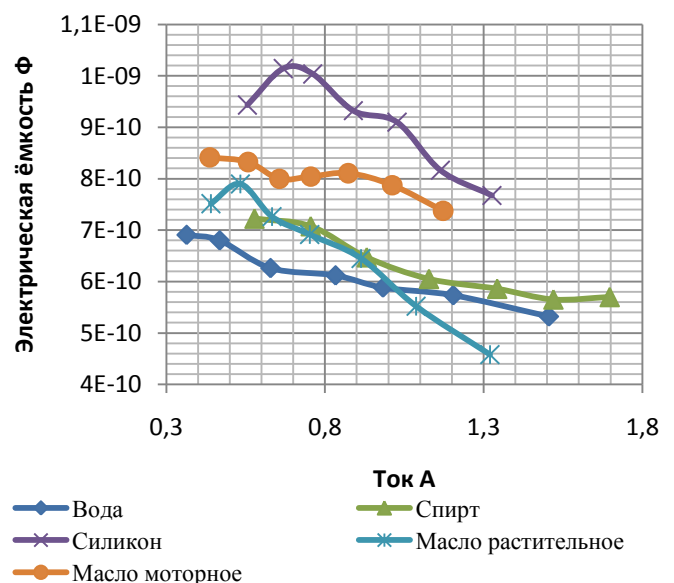


Рис. 6. Зависимость емкости от тока

Согласно системе электромеханических аналогий электрическая емкость соответствует упругости но применительно к акустической нагрузке удобнее использовать такой параметр как скорость звука в среде которая определяется упругостью и плотностью среды.

По мере увеличения тока наблюдается уменьшение величины емкостного элемента (скорости звука), это обусловлено насыщением жидкой среды парогазовыми кавитационными пузырьками и приближение её свойств к газовой среде.

### V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные практические исследования показали наличие связи между физическими свойствами обрабатываемых сред и параметрами УЗ излучателей. Наличие такой взаимосвязи позволяет контролировать свойства технологических сред подвергаемых УЗ обработке. Контролируя электрические параметры эквивалентной электрической схемы УЗКС можно контролировать такие свойства жидких сред как скорость звука в обрабатываемой среде, величину эквивалентной присоединенной массы, степень развития кавитации. Интеграция подобной системы контроля в существующее УЗ оборудование позволит с одной стороны контролировать процессы протекающие в жидких средах в УЗ полях, с другой стороны оптимизировать работу УЗ технологических аппаратов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев В.Н. Способ косвенного контроля акустической нагрузки при работе ультразвуковых технологических установок. Барсуков Р.В. Генне Д.В. // Ползуновский вестник №3 2011г.
- [2] Зернов Н.В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей / – Л.: Энергия, 1972 816 с.