

Система непрерывного контроля выходных параметров ультразвуковых технологических аппаратов

[В.Н. Хмелёв](#), [Д.С. Абраменко](#), [Р.В. Барсуков](#), [Д.В. Генне](#)

Бийский технологический институт

Алтайского государственного технического университета, Бийск, Россия

Аннотация – Статья посвящена разработке нового способа контроля амплитуды ультразвуковых колебаний, который может быть использован для непрерывного измерения непосредственно в при реализации технологического процесса. Таким образом, можно контролировать амплитуду механических колебаний излучающей поверхности за счет измерения величины тока, протекающего через механическую ветвь колебательной системы. Проведенные исследования подтвердили эффективность и точность предложенного метода.

Ключевые слова – Ультразвук, амплитуда, ток.

I. ВВЕДЕНИЕ

МАКСИМАЛЬНАЯ эффективность различных технологических процессов, реализуемых под действием ультразвуковых колебаний, может быть достигнута только при обеспечении оптимальных параметров ультразвукового воздействия.

Одним из основных параметров, характеризующих ультразвуковое воздействие, является амплитуда механических колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы [1]. Величина амплитуды колебаний излучающей поверхности зависит от электромеханических свойств колебательной системы, согласованности с электронным генератором и акустических характеристик обрабатываемых сред.

Из-за экстремального характера кавитационного воздействия в жидких средах, необходимо не только устанавливать определенное значение амплитуды колебаний для инициирования процессов, но поддерживать оптимальное значение амплитуды при различных изменениях параметров сред (плотность, концентрация, вязкость) и влияния дестабилизирующих факторов (изменениях температуры сред и материалов колебательной системы, демпфирующего действия среды на колебательную систему т.п.).

В связи с тем, что оптимальное ультразвуковое воздействие обеспечивает максимальную производительность процесса и получение конечного продукта наилучшего качества, возникает необходимость в непрерывном контроле параметров ультразвукового воздействия (амплитуды колебаний). При этом, контроль необходим в течение всего жизненного цикла УЗ аппарата, начиная с его первоначальной настройки, реализации технологических процессов, диагностики и ремонта.

Наибольшее применение для контроля нашли способы непосредственного измерения амплитуды путем визуального наблюдения колебаний излучающей поверхности через микроскоп. Из таких способов наибольшей точностью обладает усовершенствованный способ, основанный на применении источников стробоскопического освещения [1]. Однако, его применение возможно только в прозрачной воздушной среде и поэтому он может быть применен только для настройки и предварительной диагностики УЗ аппаратов, не учитывающей влияния жидких сред.

Из-за особенностей практической реализации УЗ технологий (необходимости проведения измерений в жидкостях, в том числе и агрессивных, кавитационного разрушения вносимых датчиков) все методы традиционной виброметрии не пригодны для решения задачи непрерывного контроля амплитуды колебаний в технологических аппаратах.

В связи с этим возникает необходимость в создании нового способа контроля амплитуды колебаний, способного обеспечивать непрерывные измерения не только в процессе настройки, но и в процессе эксплуатации УЗ технологических аппаратов. Способ должен быть основан на косвенных измерениях электрических параметров самого УЗ аппарата, определяемых амплитудой механических колебаний излучающей поверхности.

II. ТЕОРИЯ

Как известно [2] пьезоэлектрическая УЗ колебательная система (УЗКС) является электрической нагрузкой для электронного генератора. Она изменяет свои электрические параметры под действием внешних воздействий со стороны обрабатываемой среды (изменение акустической нагрузки), внешних воздействий со стороны электронного генератора (изменение питающего напряжения и протекающего тока), а также при изменении внутреннего состояния (изменение температуры, колебательных смещений и напряжений).

Анализ эквивалентной схемы пьезоэлектрической системы позволяет установить, что значение амплитуды механических колебаний УЗКС, в интервале линейности свойств системы, прямо пропорционально значению тока механической ветви (разнице между полным током колебательной системы и его емкостной составляющей, обусловленной собственной электрической емкостью пьезоэлементов системы), т.е. определяется как:

$$A = M \cdot I_m,$$

где A – амплитуда механических колебаний излучающей поверхности УЗКС, I_m – ток механической ветви УЗКС, M – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, контролировать амплитуду механических колебаний излучающей поверхности можно путем измерения части электрического тока, протекающего через пьезоэлектрическую колебательную систему.

К сожалению, такой способ не получил практического распространения из-за отсутствия информации о значении и зависимости величины коэффициента пропорциональности от параметров используемых пьезоэлектрических колебательных систем.

Для практического применения способа, подтверждения возможности контроля абсолютной величины амплитуды колебаний излучающей поверхности по электрическим параметрам УЗКС, создания специализированных устройств для практической реализации метода, установления точности таких измерений и определении границ их применимости в реальных условиях работы УЗ аппарата необходимо детальное исследование способа.

Теоретическое определение коэффициента пропорциональности M затруднено, поскольку он характеризует одновременно преобразование электрической энергии в согласующем колебательном контуре электронного генератора, преобразование электрической энергии в упругие механические колебания пьезоэлектрических элементов и усиление этих колебаний при распространении вдоль всей колебательной системы.

В большинстве случаев влияние всех перечисленных параметров преобразования и усиления определяется при проектировании конструкции УЗКС и настройке электронного генератора, и остаются неизменными в течение всего срока эксплуатации УЗ аппарата. В процессе эксплуатации УЗ аппарата, при использовании одной колебательной системы и ее комплектации различными сменными рабочими инструментами (полуволновой или многополуволновой длины) возможно изменение коэффициента усиления, характеризующего усиление механических колебаний при их распространении вдоль системы. В этом случае значение коэффициента пропорциональности M будет зависеть от коэффициента усиления сменного рабочего инструмента и может быть представлено в следующем виде:

$$M = M' \cdot K_{yc}$$

где M' – коэффициент пропорциональности между величиной тока механической ветви и амплитудой механических колебаний, не учитывающий коэффициента усиления УЗКС, K_{yc} – коэффициент усиления рабочего инструмента УЗКС.

Таким образом, для контроля величины амплитуды механических колебаний непосредственно в процессе работы УЗ аппарата необходимо произвести калибровку (расчет величины коэффициента M по измеренным значениям A и I_m), т.е. произвести синхронные измерения амплитуды механических колебаний и амплитуды тока механической ветви УЗКС при последовательном увеличении напряжения питания УЗКС. Значение тангенса угла наклона графика зависимости амплитуды механических колебаний от величины тока механической ветви, к оси абсцисс будет соответствовать значению коэффициента M .

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для выявления зависимостей были проведены экспериментальные исследования по практическому определению коэффициента пропорциональности. В качестве контрольного был использован наиболее простой, точный и универсальный способ непосредственного измерения абсолютной величины амплитуд – стробоскопический [мой патент, статья про особенности применения]. Измерения производились при помощи УЗ терапевтического аппарата «ТОНЗИЛ-ЛОП-ММ» [3].

Выбор аппарата для экспериментальных исследований был обусловлен тем, что он в составе стандартной поставки оснащается набором сменных рабочих инструментов, отличающихся длиной (полуволновые, двухполуволновые), формой рабочего окончания и требуемым уровнем амплитуды механических колебаний на рабочей поверхности. Внешний вид использованных в исследованиях рабочих инструментов представлен на Рис. 1.

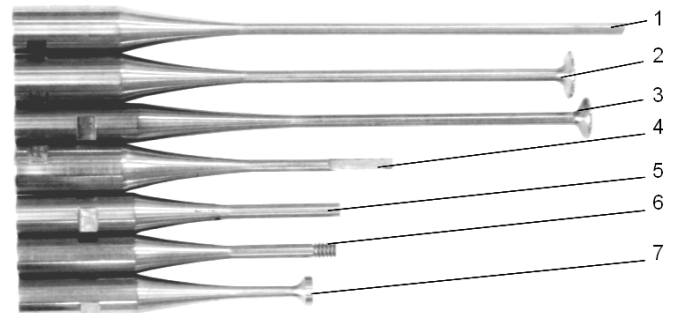


Рис. 1. Внешний вид сменных рабочих инструментов

При проведении исследований использовалась одна колебательная система и различные инструменты, из числа показанных на рисунке 1. Были проведены синхронные измерения амплитуды механических колебаний посредством стробоскопического способа и амплитуды тока механической ветви, при закреплении на УЗКС различных сменных рабочих инструментов. Стандартная схема системы управления электронного генератора была дополнена измерительной схемой, реализующей разностный способ измерения тока, протекающего в механической ветви УЗКС. Измерения проводились при отсутствии влияния акустической нагрузки на рабочий инструмент (измерения производились в воздухе).

Полученные графики зависимости амплитуды механических колебаний от величины тока механической ветви представлены на Рис. 2. Из полученных результатов следует, что зависимость величины амплитуды механических колебаний излучающей поверхности от тока механической ветви пьезоэлектрической колебательной системы является линейной во всем рабочем диапазоне амплитуд.

Если аппроксимировать зависимости до пересечения с осью ординат, то точка пересечения находится выше центра координат. Это позволяет сделать вывод о том, что при нулевом значении тока механической ветви существует некоторый уровень амплитуды механических колебаний. Практически это невозможно, и вероятнее всего объясняется более сложной формой зависимости амплитуды от величины тока при малых значениях. Поскольку эта область амплитуд редко применяется на практике, а так же сложности обеспе-

чения устойчивой работы в этой области, в дальнейшем она не рассматривается.

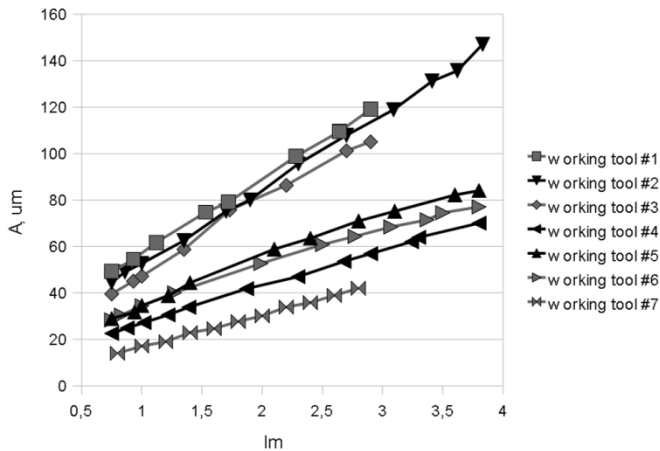


Рис. 2. График зависимости амплитуды механических колебаний от тока механической ветви для различных по длине рабочих инструментов

Для расчета значения тангенса угла наклона была проведена линейная аппроксимация полученных зависимостей. В результате для каждой графической зависимости было получено уравнение вида:

$$A = M \cdot I_m + C$$

где C – это значение амплитуды механических колебаний в точке пересечения с осью ординат.

Численные значения общего коэффициента усиления для УЗКС с различными рабочими инструментами были получены на этапе проектирования, и использовались для расчета численного значения коэффициента M' . Все полученные данные сведены в итоговую таблицу 1.

ТАБЛИЦА I
 РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

№ рабочего инструмента	C	M	K_{yc}	M'
1	20,81	32,27	28,11	1,148
3	16,99	31,17	28,5	1,094
2	19,82	32,51	28,45	1,143
4	19,46	15,65	14,73	1,062
5	16,57	18,63	16,55	1,126
6	18,49	16,05	15,35	1,046
7	20,07	14,31	13,16	1,087

Из таблицы следует, что значение коэффициента M' для колебательной системы со всеми инструментами является величиной постоянной, отклонение от среднего значения не превышает 5%. Следовательно, если УЗ аппарат содержит в своем составе набор сменных рабочих инструментов, присоединяемых к одному УЗ преобразователю, процесс расчета значения коэффициента M можно значительно ускорить путем расчета значения коэффициента M' только для одного любого рабочего инструмента, и последующего умножения на коэффициент усиления для выбранного рабочего инструмента.

Поскольку интересующие нас технологические процессы связаны с ультразвуковым воздействием на жидкости, были проведены дополнительные исследования, заключающиеся в измерении амплитуды механических колебаний при стабилизации величины тока механической ветви и постепенном увеличении акустической нагрузки. Результаты свидетельствуют о том, что значение акустической нагрузки (изменения плотности, вязкости и т.п.) не влияет на точность полученной зависимости.

Эти исследования проводились следующим образом. Колебательная система жестко фиксировалась. Стробоскопический измеритель настраивался на измерение в точке рабочего окончания, совпадающей с геометрическим центром рабочего окончания. За начальное состояние принималось такое значение питающего напряжения, при котором величина амплитуды механических колебаний составляла 40 мкм. Затем к области рабочего окончания близкой к точке измерения амплитуды прижималась резиновый элемент. Конечным усилием прижима принималось усилие, при котором величина питающего напряжения увеличивалась на 50% по отношению к исходному состоянию (работа без акустической нагрузки). Внутри указанного интервала проводилось пять измерений. Результаты измерений показали, что в пределах указанных акустических нагрузок, стабилизация величины тока механической ветви обеспечивает стабилизацию амплитуд механических колебаний с точностью не менее 7%. Полученные результаты были подтверждены при проведении исследований с применением других ультразвуковых аппаратов.

VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенных исследований теоретически установлена и экспериментально подтверждена возможность контроля амплитуды механических колебаний пьезоэлектрической колебательной системы по величине электрического тока, протекающего через механическую ветвь системы. Результаты измерений показали адекватность таких измерений и возможность применения предложенного способа для измерения амплитуды механических колебаний непосредственно в процессе реализации любого технологического процесса.

Кроме того, в результате проведенных исследований теоретически установлено и экспериментально доказано следующее:

1. Зависимость амплитуды механических колебаний излучающей поверхности пьезоэлектрической колебательной системы от величины тока ее механической ветви является линейной во всем рабочем диапазоне амплитуд (до 150 мкм) ультразвукового аппарата.

2. При оснащении УЗ технологических аппаратов одной колебательной системой с несменным рабочим инструментом, после расчета численного значения коэффициента пропорциональности M возможно однозначное сопоставление амплитуды механических колебаний и тока механической ветви в процессе реализации любого процесса, основанного на использовании УЗ колебаний.

3. При оснащении УЗ технологических аппаратов одной колебательной системой с набором сменных рабочих инструментов для однозначного сопоставления амплитуды меха-

нических колебаний и тока механической ветви необходимо произвести расчет значения коэффициента пропорциональности M для каждого рабочего инструмента. Процесс калибровки можно значительно упростить, если использовать коэффициент пропорциональности M' и известные значения коэффициентов усиления УЗКС с каждым рабочим инструментом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. М.: Металлургия, 1974
- [2] А. В. Донской, О. К. Келлер, Г. С. Кратыш, "Ультразвуковые электро-технологические установки" - 2-е издание - Ленинград, Энергоиздат, 1982 г.
- [3] Khmelev V.N., Abramenko D.S., Pedder V.V., Tsyganok S.N., Barsukov R.V. "[Investigation of Functional Facilities of Piezoelectric Transducers](#) ", Tenth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'09, Novosibirsk, NSTU.
- [4] [Способ измерения амплитуды колебаний](#) [Текст]: пат. №2292530 Российская Федерация: МПК7 G01H9/00 / Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Савин И.И., Абраменко Д.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2005111032/28; заявл. 14.04.05; опубл. 27.01.07, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
- [5] Khmelev V.N., Abramenko D.S., Barsukov R.V., Lebedev A.N. "[Usage Features of Contact and Noncontact Measuring Methods of Oscillation Amplitude During Adjustment Process of Ultrasonic Devices](#)", Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008.