

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Д.С. Абраменко, В.Н. Хмелёв, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне, А.В. Шалунов

Бийский технологический институт, г. Бийск

В статье представлены результаты теоретических и практических исследований косвенного способа измерения амплитуды механических колебаний. Данный способ основан на расчете величины амплитуды по величине тока протекающего в механической ветви ультразвуковой колебательной системы. Результаты экспериментального исследования подтвердили эффективность и точность данного способа измерения и позволили сформулировать рекомендации по его практическому использованию.

Ключевые слова: ультразвук, колебания, амплитуда, измерение.

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]. 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 влиянии 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.

Хотя современная виброметрия располагает большим количеством различных методов (механические – контактные, индукционные, оптические и другие), практически все они разработаны для проведения измерений на низких

частотах (десятки-сотни герц), и могут применяться с большими ограничениями для измерения амплитуды колебаний УЗ частоты. 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 процессе реализации процессов химических технологий.

Был предложен модернизированный способ непосредственного измерения амплитуды путем визуального наблюдения колебаний излучающей поверхности через микроскоп [2] с использованием двух источников стробоскопического освещения.

Опытная реализация способа показала его высокую точность и эффективность при первоначальной настройке, диагностике и ремонте УЗ аппаратов различного типа и назначения. Его применение возможно только в прозрачной воздушной среде, не учитывающей влияния жидких сред.

Основным недостатком способа контроля является невозможность его применения для контроля в жидких средах, при размерной обработке, т.е. в тех случаях, когда нет возможности осуществлять визуальное наблюдение колеблющейся поверхности.

Таким образом, возникла необходимость создания универсального метода контроля амплитуды при невозможности визуального наблюдения колеблющейся поверхности, пригодного для применения непосредственно в процессе реализации любого технологического процесса.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Очевидно, что в этом случае, способ должен быть основан на косвенных измерениях электрических параметров самого УЗ аппарата. Поскольку известно, что выходные параметры УЗКС зависят от режима электрического питания, возникает необходимость определить - какая из электрических величин, контролируемых на входе преобразователя: напряжение, сила тока или мощность способна дать информацию о значении амплитуды механических колебаний.

Для выявления такой электрической величины следует воспользоваться универсальным методом У. Мэзона и методом электромеханических аналогий [3]. Такой подход позволяет создать эквивалентную схему замещения пьезоэлектрической УЗКС. На резонансной частоте схему замещения удобно представить в следующем виде (рис. 1).

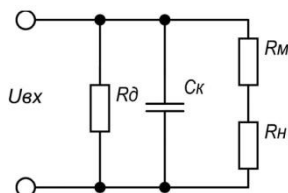


Рис. 1. Схема замещения пьезоэлектрического преобразователя на резонансной частоте.

В представленной схеме замещения активное сопротивление эквивалентно сопротивлению механических потерь, $R_{д}$ - сопротивлению излучения, $C_{к}$ - электрической емкости пьезокерамических элементов, $R_{м}$ - диэлектрическим потерям.

Сопротивление механических потерь обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях. Сопротивление излучения определяется параметрами излучателя и пропорционально волновому сопротивлению окружающей среды. Электрическая емкость обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью материала преобразователя.

Вдали от частот резонанса ток в цепи возбуждающих электродов мал и определяется в основном межэлектродной емкостью. По мере приближения частоты возбуждающего напряжения к частоте механического резонанса УЗКС — амплитуда механических колебаний растет, достигая максимума на этой частоте. Пропорционально возрастает и заряд на электродах. Полярность зарядов изменяется с частотой входного сигнала, в результате через пьезоэлектрический элемент протекает переменный ток, пропорциональный амплитуде механических колебаний.

Анализ эквивалентной схемы пьезоэлектрической системы позволил

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 пьезоэлектрических элементов системы), т.е. определяется как:

где A — амплитуда механических колебаний излучающей поверхности УЗКС, I — ток механической ветви УЗКС, K — коэффициент пропорциональности.

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 определения границ их применимости в реальных условиях работы УЗ аппарата необходимо детальное исследование процесса контроля амплитуды по электрическим параметрам УЗКС.

Для выявления характера зависимостей были проведены экспериментальные исследования по практическому определению коэффициента пропорциональности. Для измерения амплитуды механических колебаний был использован стробоскопический метод измерения [2, 4]. Для исследования был взят серийный терапевтический ультразвуковой аппарат «Тонзиллор-ММ» [5], поскольку в стандартную комплектацию включен набор сменных рабочих инструментов, каждый из которых имеет различную форму и длину. Внешний вид рабочих инструментов представлен на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид сменных рабочих инструментов

Стандартный набор включает рабочие инструменты двух длин: полуволновые (рабочие инструменты №5, 6 и 7) и двухполуволновые (рабочие инструменты №1 и 2). Инструменты не

только отличаются по длине (полуволновые и волновые) но и отличаются конструктивно тем, что диаметр торца, в котором выполнено резьбовое отверстие для шпильки, различаются. Для экономии материала (титановый сплав) группа полуволновых рабочих инструментов выполняется из прутка меньшего диаметра. Для получения более полной информации о характере зависимости амплитуды механических колебаний от величины тока, протекающего в механической ветви УЗКС, набор инструментов был дополнен рабочими инструментами №3 и 4. Основным отличием этих рабочих инструментов является, то, что диаметр соединительного торца рабочего инструмента №4 соответствует группе двухполуволновых, хотя и имеет полуволновую длину. Для рабочего инструмента №3 справедливо противоположное утверждение (двухполуволновой инструмент с соединительным торцом меньшего диаметра). Оба эти рабочих инструмента были согласованы по частоте с электроакустическим преобразователем УЗКС.

Были проведены синхронные измерения амплитуды механических колебаний посредством стробоскопического способа и измерением амплитуды тока механической ветви, при закреплении на УЗКС различных сменных рабочих инструментов. Стандартная схема системы управления электронного генератора была дополнена измерительной схемой, реализующий 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. 3.

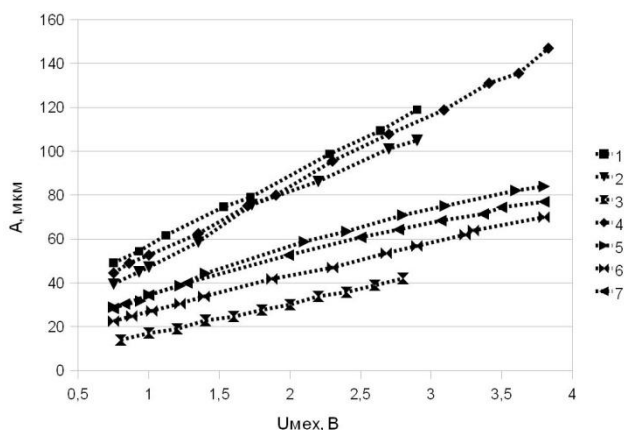


Рис. 3. График зависимости амплитуды механических колебаний от величины напряжения, пропорциональной току механической ветви, для различных рабочих инструментов

Анализ зависимостей показал следующее:

– амплитуда механических колебаний при увеличении тока протекающего в механической ветви УЗКС является линейной для всех рабочих инструментов, причем линейность не нарушается во всем рабочем диапазоне амплитуд (от 25 до 90–150 мкм для разных типов рабочих инструментов);

– графики зависимости амплитуды колебаний от тока отличаются только углом наклона, причем угол наклона зависит от длины рабочего инструмента, а при разных длинах, от площади излучающей поверхности. Первое иллюстрируется тем, что все зависимости можно разделить на две группы по величине угла наклона и в каждой группе рабочие инструменты с самой большой площадью излучающей поверхности (рабочий инструмент №2 для первой группы и рабочий инструмент №7 для второй) имеет наименьший угол наклона. Второе иллюстрируется тем, что все графики двухполуволновых рабочих инструментов имеют угол наклона приблизительно в два раза больший, чем полуволновые рабочие инструменты.

Таким образом, в результате исследований показано, что при отсутствии акустической нагрузки, действующей на излучающую поверхность, зависимость амплитуды механических колебаний от тока механической ветви УЗКС является линейной. Но этот случай является идеализированным и в реальной практике применения УЗ колебаний практически не встречается, поэтому необходимо произвести дополнительные исследования влияния акустической нагрузки на линейность этой зависимости. Дальнейшие исследования заключались 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.

При проведении исследований, 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 60 мкм. Затем к области рабочего окончания близкой к точке измерения амплитуды прижимался 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 четыре измерения. 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.

Внешний вид экспериментальной установки представлен на рис. 4. Серия светотеневых изображений представлена на рис. 5.

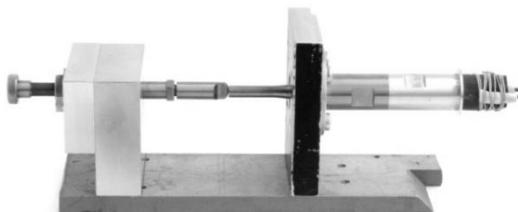


Рис. 4. Внешний вид установки позволяющей изменить усилие прижима к излучающей поверхности

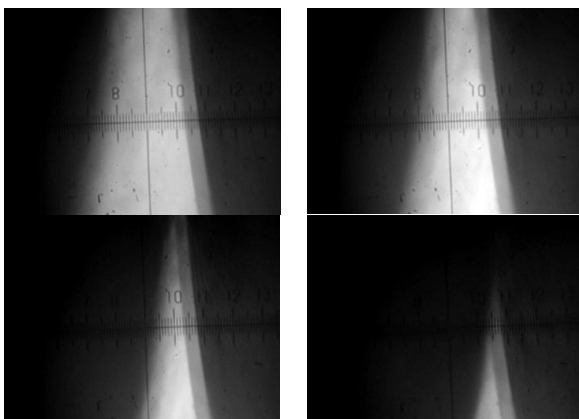


Рис. 5. Серия светотеневых изображений колебательного процесса, иллюстрирующих неизменность амплитуды механических колебаний при изменении усилия прижима

Результаты исследований позволили сделать вывод об отсутствии, или точнее, незначительном влиянии акустической нагрузки на линейность исследуемой зависимости.

Как было показано, величина угла наклона исследуемой зависимости определяется длиной рабочего инструмента только для стандартного набора рабочих инструментов. Площадь излучающей поверхности хотя и оказывает влияние на угол наклона, но сложна в вычислении и не всегда очевидна, из-за того что некоторые рабочие инструменты имеют рабочее окончание сложной формы. В связи с этим возникла необходимость провести дополнительные исследования для выявления параметра, УЗКС наиболее полно характеризующего значение коэффициента пропорциональности M .

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 будет зависеть от коэффициента усиления УЗКС с закрепленным сменным рабочим инструментом и может быть представлено в следующем виде:

где M – коэффициент пропорциональности между величиной тока механической ветви и амплитудой механических колебаний, не учитывающий коэффициента усиления УЗКС, K – коэффициент усиления УЗКС с закрепленным сменным рабочим инструментом.

Поэтому, 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), 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 .

Для дальнейшего анализа характера зависимостей была проведена линейная аппроксимация полученных данных, зависимостью вида:

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

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

Численные значения общего коэффициента усиления для УЗКС с различными рабочими инструментами были получены на этапе проектирования, и использовались для расчета численного значения коэффициента

Все полученные данные сведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты линейной аппроксимации результатов измерения

№ рабочего инструмента				
1	20,81	32,27	28,11	1,148
2	19,82	32,51	28,45	1,143
3	16,99	31,17	28,5	1,094
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 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 М можно значительно ускорить путем расчета значения коэффициента только для одного любого рабочего инструмента, и последующего умножения на коэффициент усиления для выбранного рабочего инструмента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований косвенного способа измерения амплитуды колебаний показано следующее:

– способ пригоден для контроля амплитуды при невозможности визуального наблюдения изучающей поверхности, т.е. в процессе реализации большинства технологических процессов;

– точность измерения амплитуды колебаний не зависит от величины акустической нагрузки на УЗКС, при ее работе в номинальном режиме;

– зависимость амплитуды механических колебаний от величины тока механической ветви является линейной для всех рабочих инструментов, и отличается углом наклона;

– одним из основных параметров УЗКС, определяющим значение угла наклона, является коэффициент усиления УЗКС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Агранат, Б.А. Основы физики и техники ультразвука [Текст] / Б.А. Агранат [и др.]. – М.: Высшая школа, – 1987. – 352 с.

2. Способ измерения амплитуды колебаний [Текст]: Пат. 2292530 Российская Федерация, МПК G 01 H 9/00. / Г.В. Леонов, В.Н. Хмельев, Д.С. Абраменко, И.И. Савин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – №2005111032/28; заявл. 14.04.2005; опубли. 27.01.2007, Бюл. № 3 – 10с.: ил.

3. Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки [Текст] / Донской А.В., Келлер О.К., Кратыш Г.С. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 276 с.

4. Abramenko, D.S. Usage Features of Contact and Noncontact Measuring Methods of Oscillation Amplitude During Adjustment Process of Ultrasonic Devices [Текст] / Abramenko, D.S., Khmelev V.N., Barsukov R.V., Lebedev A.N. // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008. - P.223-226.

5. Д.С. Абраменко. Исследование функциональных возможностей пьезоэлектрических преобразователей [Текст] / В.Н. Хмельев, Д.С. Абраменко, В.В. Педдер, С.Н. Цыганок, Р.В. Барсуков // Tenth international conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'09: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 233–241.

Абраменко Денис Сергеевич – старший преподаватель кафедры МСИА, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432580, e-mail: ades@bti.secna.ru.

Хмельев Владимир Николаевич – д.т.н., профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432580, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Барсуков Роман Владиславович – к.т.н., доцент кафедры Методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ тел. (3854) 432570, e-mail: roman@bti.secna.ru.

Генне Дмитрий Владимирович – инженер лаборатории акустических процессов и аппаратов, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854)432570, e-mail: gdv@bti.secna.ru.

Шалунов Андрей Викторович – к.т.н., доцент кафедры Методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ. тел. (3854)432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.