

СПОСОБ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАБОТЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Для вычисления расхода следует найденное значение S_t разделить на T . Таким образом, можно вычислить среднее значение тока поляризации в указанном промежутке времени. Если известна зависимость между током поляризации и объемом сыпучего вещества, просыпанного через емкостный преобразователь, можно измерять объемный расход. При известной плотности контролируемого материала, объем вещества можно перевести в единицы массы, что позволяет измерять массовый расход.

Выводы

1. Экспериментальные данные показали, что разработанный метод позволяет определять объемный и массовый расход сыпучего вещества, прошедшего через емкостный преобразователь. Так как метод опирается на явление поляризации, присутствующее только в диэлектриках, это обстоятельство ограничивает его применение непроводящим веществом.

2. Метод может быть использован в пневмотранспортных системах и трубопроводах промышленных и сельскохозяйственных предприятиях. Метод является бесконтактным, простым и недорогим в реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества: справочник / П. П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
2. Arakaki, C. Non intrusive mass flow measurements / C. Arakaki [et al.] // POSTEC Newsletter – 2006. – № 23. – pp. 15-16.
3. Sanderson, M. Guidelines for the Use of Ultrasonic Non-Invasive Metering Techniques /M. Sanderson, H. Yeung // Flow Measurement and Instrumentation, vol. 13 – 2002. – pp. 125-142.
4. Fuchs, A Measuring flow parameters of particulate and powdery solids in industrial transportation processes / A. Fuchs, H. Zangl // International journal on smart sensing and intelligent systems – 2008. – №2. – pp 388-402
5. Shao, F. Study and Industrial Evaluation of Mass Flow Measurement of Pulverized Coal for Iron-Making Production / F. Shao, Z. Lu, E. Wu, S. Wang // Flow Measurement and Instrumentation – 2000. – №11. – pp. 159-163.
6. Godbole, A Particle Trajectories in Dilute Phase Pneumatic Conveying / A. Godbole, B. Kosasih, A. Fuchs // Particulate Science and Technology – 2007. – №4. – pp. 381-385.
7. Параметрические первичные измерительные преобразователи /В.В. Евстигнеев, М.М. Горбов, О.И. Хомутов. – М.: Высш. шк., 1997. – 181 с.

В.С. Афонин – Afonin@mail.altstu.ru; к.т.н., доцент. **О.И. Хомутов**, д.т.н., профессор.

УДК 621.317.33

СПОСОБ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАБОТЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Д.В. Генне

Рассмотрены вопросы косвенного определения параметров, напрямую связанных с величиной и характером акустического сопротивления сред подвергаемых ультразвуковому воздействию. Предлагаемый способ контроля параметров акустических сред основан на контроле электрических параметров ультразвуковых колебательных систем, которые непосредственно контактируют с обрабатываемыми технологическими средами.

Ключевые слова: Ультразвук, ультразвуковые генераторы, акустическая нагрузка, контроль.

Введение

Современные ультразвуковые электронные генераторы представляют собой устройства, обеспечивающие не только преобразование энергии электрической сети в энергию электрических колебаний ультразвуковой частоты для питания колебательных систем, но оптимизацию условий передачи энергии от колебательных систем в обрабатываемые среды. Необходимость обеспечения заданного или максимального энергетического воз-

действия на различные по своим свойствам и изменяющиеся в процессе обработки технологические среды, обуславливает необходимость контроля процессов, протекающих в технологических средах по действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности.

Все технологические среды, подвергаемые в ходе реализации различных процессов ультразвуковому воздействию, можно условно разделить на три группы. Это жидкие,

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

твердые, газообразные среды или их комбинации, например: «жидкость-твердое тело», «жидкость-газ» и т.п. При обеспечении вывода ультразвуковой энергии в любую технологическую среду, эту среду следует рассматривать как акустическую нагрузку на колебательную систему и ультразвуковой технологический аппарат (УЗТА). К основным акустическим характеристикам сред относят скорость звука, плотность, волновое сопротивление, вязкость, упругость, коэффициент затухания ультразвуковых (УЗ) колебаний. Необходимо учитывать также, что характеристики сред при ультразвуковом воздействии не остаются постоянными.

Поскольку ультразвуковые колебательные системы (УЗКС) непосредственно контактирует с обрабатываемой средой, излучая в нее колебания, свойства УЗКС, такие как резонансная частота, механическая добротность, входной электрический импеданс, будут зависеть от свойств обрабатываемых сред. В общем случае, любая технологическая среда будет представлять для колебательной системы комплексную нагрузку, активная часть которой обусловлена преимущественно внутренним трением частиц среды, а реактивная обусловлена упругими и инерционными свойствами обрабатываемых сред [2].

Влияние акустической нагрузки на параметры ультразвуковых колебательных систем.

Оптимальное согласование элементов, составляющих систему энергопереноса «генератор-УЗКС-технологическая среда», обеспечивает максимальное по эффективности преобразование и введение ультразвуковой энергии в технологические среды. На практике, оптимизация согласования, соответствует максимальной эффективности (производительности) работы УЗ установок и реализуемых в УЗ поле технологических процессов.

Однако, при реализации технологических процессов с использованием технологических сред с различными физическими свойствами (вода, масло, смолы и т.д.), свойства которых изменяются (например, при получении эмульсий путем смешивания двух различных жидкостей, снижении вязкости смол и масел при росте температуры, изменении дисперсности наполнителей при их диспергировании и т.п.), эффективность ультразвукового воздействия может существенно изменяться. Поскольку величина и характер акустической нагрузки (технологической среды) существенно меняются при неизменных параметрах цепи согласования

электронного генератора с УЗКС, условия оптимального согласования генератор-УЗКС нарушаются, что и объясняет снижение эффективности УЗ воздействия.

Как правило, согласование УЗКС с выходным каскадом электронного генератора осуществляется при помощи высокочастотного (ВЧ) трансформатора (Т) и компенсационной индуктивности (L), включенной последовательно с пьезоэлектрическим преобразователем (Z), [1] как показано на рисунке 1.

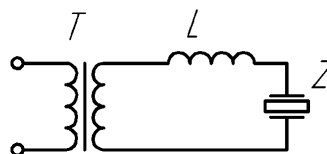


Рисунок 1 - Согласование УЗКС с выходом электронного генератора

Первоначальная настройка согласующих звеньев происходит на этапе настройки генератора и не учитывает всех возможных изменений характеристик и состояний среды, в процессе ее обработки, а без контроля этих изменений невозможно оптимизировать процесс и непрерывно контролировать состояние обрабатываемых технологических сред.

В связи с этим, возникает необходимость непрерывного контроля параметров акустической нагрузки (контроля параметров обрабатываемой среды) и включения в состав создаваемых УЗ технологических аппаратов систем контроля с перестраиваемыми системами согласования генератора и УЗКС [3].

Наличие системы контроля параметров (состояния) обрабатываемых сред позволит контролировать процессы, протекающие в непосредственной близости от излучающей поверхности колебательной системы (где не представляется возможным размещение датчиков), например, контролировать процессы формирования зоны сварки, степень развитости кавитации при обработке жидкостей высокоинтенсивными колебаниями, величину заглубления инструмента при УЗ размерной обработке хрупких материалов, степень смешивания двух жидких фаз с отличающимися свойствами при образовании эмульсий и т.п.

Таким образом, наличие зависимости параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем от свойств обрабатываемых сред делает возможным практическую реализацию контроля параметров сред путем непрерывного измерения электрических параметров УЗКС.

Для выявления электрических параметров УЗКС, наиболее полно и достоверно от-

СПОСОБ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАБОТЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ражающих состояние обрабатываемых технологических сред следует проанализировать процесс формирования УЗ колебаний и их введения в технологические среды.

Выявление зависимости электрических параметров пьезоэлектрической колебательной системы от характеристик обрабатываемых сред

Влияние величины и характера акустической нагрузки на параметры УЗКС удобно исследовать при помощи модели, представляющей собой электрические эквивалентные схемы УЗКС, работающей в режиме нагрузки.

На рисунке 2,а представлена электрическая эквивалентная схема замещения колебательной системы с пьезоэлектрической колебательной системой, справедливая в окрестностях ее резонансной частоты [2].

На эквивалентной схеме индуктивность L_m эквивалентна колеблющейся массе системы, емкость C_m – гибкости, активное сопротивление R_p – сопротивлению механических потерь, R_s – сопротивлению излучения колебательной системы, C – электрическая (статическая) емкость преобразователя, R_d – диэлектрические потери в пьезоматериале. Сопротивление механических потерь обусловлено внутренним трением частиц материала при колебаниях, а также потерями механической энергии в местах крепления колебательной системы. Сопротивление излучению определяется параметрами системы и пропорционально волновому сопротивлению среды. Электрическая емкость C пьезопреобразователя обусловлена геометрическими размерами и диэлектрической проницаемостью используемых пьезокерамических элементов.

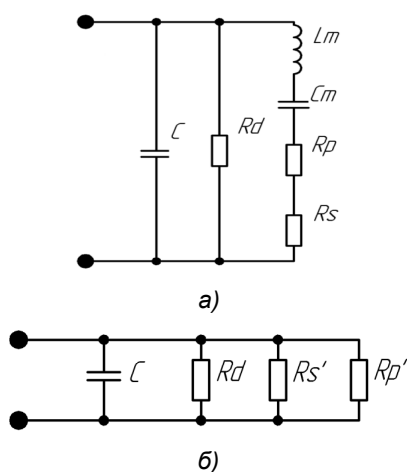


Рисунок 2 - Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы а) вблизи резонансной частоты; б) на резонансной частоте.

На резонансной частоте механического колебательного контура (L_m , C_m) эквивалентная схема системы преобразуется к виду, представленному на рисунке 2,б.

Здесь $R_{s'}$ и $R_{p'}$ – сопротивления, приведенные к параллельной схеме [2]. Приведенная эквивалентная схема не учитывает наличие нагрузки (обрабатываемой среды).

На рисунке 3 представлена эквивалентная схема УЗКС, учитывающая влияние обрабатываемой среды. В этой эквивалентной схеме элементы R_0 , L_0 , C_0 определяются свойствами УЗКС, а R_n , L_n , C_n определяются акустической нагрузкой.

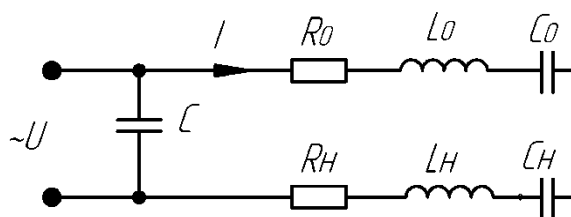


Рисунок 3 - Эквивалентная схема пьезоэлектрической колебательной системы учитывающая влияние нагрузки

Из анализа модели следует, что акустическая нагрузка УЗКС имеет как активную составляющую, представленную на схеме элементом R_n , так и реактивную составляющую, представленную на схеме элементами L_n и C_n которые обусловлены как свойствами обрабатываемой среды так и геометрией рабочего объема.

Таким образом, при наличии акустической нагрузки и изменении ее величины или характера, нарушаются условия передачи энергии от генератора к обрабатываемой среде. Возможность определения численного значения элементов R_n , L_n , C_n , позволит контролировать, с одной стороны процессы, протекающие в УЗ поле, с другой стороны производить корректировку параметров согласующих элементов УЗТА.

Электрический ток, протекающий по элементам R_0 , L_0 , C_0 и R_n , L_n , C_n принято называть током механической ветви. Его величина прямо пропорциональна амплитуде механических колебаний, а амплитудно- и фазочастотные характеристики соответствуют частотным характеристикам УЗКС как механической колебательной системы.

Для определения параметров системы контроля необходимо знание диапазонов возможного изменения параметров обраба-

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

тываемых сред и контролируемых электрических параметров.

Расчет значений элементов эквивалентной схемы узкс

Расчет элемента R_0 , определяющего собственные потери ультразвуковой колебательной системы, осуществляется при помощи выражения:

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}, \quad (1)$$

Где U_0 и I_0 напряжение на пьезоэлементах и ток механической ветви, измеренные при работе УЗКС без нагрузки на резонансной частоте ω_0 .

Индуктивный элемент L_0 определяется из выражения:

$$L_0 = \frac{Q_0 R_0}{\omega_0}, \quad (2)$$

где Q_0 - добротность УЗКС при отсутствии акустической нагрузки (собственная добротность УЗКС). Выполнив подстановку в (2) с учетом выражения (1) получим конечное выражение:

$$L_0 = \frac{Q_0 U_0}{\omega_0 I_0}, \quad (3)$$

Используя формулу Томпсона на $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$, выразим C_0 :

$$C_0 = \frac{1}{\omega_0^2 L_0}, \quad (4)$$

Выполнив подстановку L_0 в выражение (4) получим конечное выражение для C_0 :

$$C_0 = \frac{I_0}{\omega_0^2 Q_0 U_0}, \quad (5)$$

В режиме акустической нагрузки суммарное активное сопротивление механической ветви определяется как:

$$R_0 + R_n = \frac{U_n}{I_n}, \quad (6)$$

Где U_n, I_n - напряжение на пьезоэлементах УЗКС и ток механической ветви измеренные при работе УЗКС в режиме акустической нагрузки на резонансной частоте ω_n . Конечное выражение для элемента R_n определяется как:

$$R_n = \frac{U_n}{I_n} - \frac{U_0}{I_0}, \quad (7)$$

Суммарная индуктивность механической ветви для случая работы в режиме акустической нагрузки определяется как:

$$L_0 + L_n = \frac{Q_n U_n}{\omega_n I_n}, \quad (8)$$

Где Q_n - добротность УЗКС измеренная в режиме акустической нагрузки.

Конечное выражение для индуктивности, определяемой акустической нагрузкой определяется как:

$$L_n = \frac{Q_n U_n}{\omega_n I_n} - \frac{Q_0 U_0}{\omega_0 I_0}, \quad (9)$$

Суммарная емкость механической ветви определяется из выражения:

$$\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_n} = \frac{\omega_n Q_n U_n}{I_n}, \quad (10)$$

Конечное выражение для емкости определяемой акустической нагрузкой определяется как:

$$C_n = \left[\frac{\omega_n Q_n U_n}{I_n} - \frac{\omega_0 Q_0 U_0}{I_0} \right]^{-1}, \quad (11)$$

Собственная добротность УЗКС Q_0 и добротность УЗКС в нагруженном режиме Q_n можно определить исходя из амплитудно-частотных характеристик тока механической ветви, полученных в режиме холостого хода и режиме нагрузки. На рисунке 4 представлены АЧХ тока механической ветви для случая ненагруженной УЗКС (кривая 1) и случая нагруженной УЗКС (кривая 2).

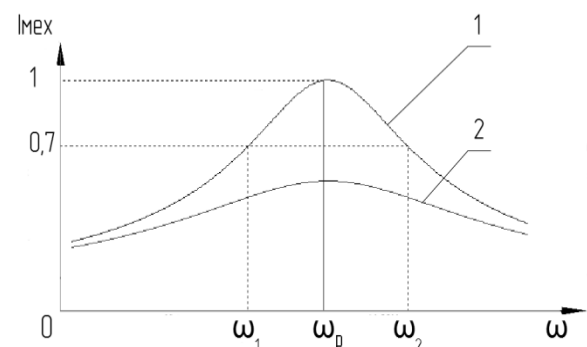


Рисунок 4 - Амплитудно-частотные характеристики тока механической ветви УЗКС

Для расчета добротности используется следующее выражение:

СПОСОБ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ РАБОТЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

$$Q = \frac{\omega_p}{|\omega_1 - \omega_2|}, \quad (12)$$

Где ω_p - частота соответствующая максимуму на резонансной кривой, ω_1, ω_2 - частоты соответствующие амплитуде равной $\frac{I_n}{\sqrt{2}}$.

Таким образом, описанная выше методика, позволяет определять численные значения элементов, определяющих свойства обрабатываемых сред.

Практическая реализация косвенного контроля характеристик обрабатываемых сред

Для практической реализации способа косвенного контроля параметров обрабатываемых сред была разработана структура системы контроля (измерительной части) ультразвукового электронного генератора, представленная на рисунке 5.

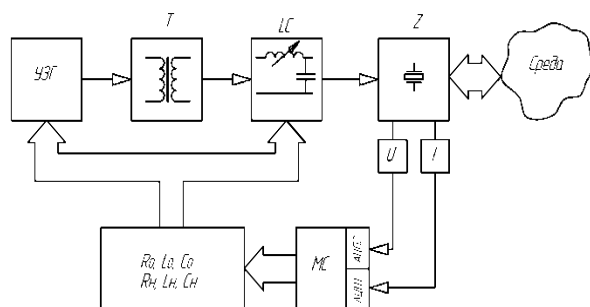


Рисунок 5 - Структурная схема измерительной части ультразвукового электронного генератора

В состав измерительной схемы входят блок выделения тока механической ветви (I), цепь измерения напряжения на пьезоэлементах УЗКС (U), и управляющий микроконтроллер (MC). Блок выделения тока механической ветви [4] состоит из токовых датчиков для тока, потребляемого УЗКС, тока, протекающего по опорной емкости, и дифференциального усилителя, осуществляющего вычитание емкостного тока из тока УЗКС. Полученная информация о напряжении на пьезоэлементах УЗКС, токе механической ветви и фазовых соотношениях этих сигналов, а также информация о наличии нагрузки УЗКС поступает на управляющий микроконтроллер который управляет частотой генератора, и производит выше описанные вычисления для случаев холостого хода и режимах работы УЗКС при наличии нагрузки, а так же вырабатывает управляющие сигналы для блока согласования (LC) электронного генератора и УЗКС.

В.Н. ХМЕЛЕВ, Р.В. БАКСУКОВ, Д.В. ГЕННЕ

Процесс контроля параметров акустической нагрузки разделяется на два этапа: этап определения собственных эквивалентных параметров УЗКС и этап определения непосредственно параметров акустической нагрузки.

Этап определения собственных эквивалентных параметров УЗКС представлен в виде следующих действий (УЗКС должна работать в режиме холостого хода):

- Получение АЧХ тока механической ветви подключенной УЗКС;
- Определение по АЧХ значения $\omega_p, \omega_1, \omega_2$ и тока, соответствующего частоте ω_p , вычисление добротности по формуле (12);
- Измерение напряжения питания УЗКС на частоте ω_p и вычисление R_0 по формуле (1);
- Вычисление значения элементов L_0 и C_0 , используя формулы (3) и (5);
- Сохранение в энергонезависимой памяти микроконтроллера значений элементов R_0, L_0, C_0 для последующих расчетов R_n, L_n, C_n .

Этап определения параметров акустической нагрузки представлен в виде следующих действий (УЗКС работает в режиме нагрузки):

- Получения АЧХ тока механической ветви подключенной УЗКС;
- Определение значения $\omega_p, \omega_1, \omega_2$ и тока, соответствующий частоте ω_p по АЧХ, вычисление добротности по формуле (12);
- Измерение напряжения питания УЗКС на частоте ω_p и вычисление значения R_n по формуле (7);
- Вычисление значения элементов L_n и C_n используя формулы (8,9) и (10,11).

Предложенный способ может быть реализован в ультразвуковых технологических аппаратах с целью получения информации об обрабатываемой среде для управления процессом ультразвукового воздействия и корректировки согласующих цепей УЗГ в зависимости от акустической нагрузки на УЗКС.

Заключение

Предложенный и разработанный способ косвенного контроля акустической нагрузки был практически апробирован в составе системы контроля ультразвукового аппарата, разработанного в Лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института, предназначенного для ка-

РАЗДЕЛ II. КОМПОНЕНТЫ И МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

витационной обработки жидких сред и прошел лабораторные испытания. Измерения параметров пьезоэлектрической колебательной системы, проведенные при УЗ обработке различных жидкостей, позволили подтвердить возможность косвенного контроля величины и характера акустической нагрузки, подвгаемой ультразвуковому воздействию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203с.
2. Донской А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки Л.:Энергоиздат, 1982 208 с.
3. Хмелев В.Н., Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов [Текст] / Хме-

лев В.Н., Генне Д.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В., Абраменко Д.С. // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4. С. 139-143.

4. Абраменко Д.С. Способ контроля амплитуды ультразвукового воздействия [Текст] / Хмелев В.Н., Абраменко Д.С., Барсуков Р.В., Шалунов А.В., Генне Д.В. //Журнал Датчики и системы, 2010. – №12. – С. 43 – 47.

*Д.т.н., профессор, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации **В.Н. Хмелев** тел. 8-(385-4)-43-25-70. vnh@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ; К.т.н., доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации **Р.В. Барсуков** тел. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ; инженер лаборатории акустических процессов и аппаратов **Д.В. Генне**, тел. (3854)432570, e-mail: gdv@bti.secna.ru, Бийский технологический институт (филиал) ГОУВПО АлтГТУ.*