

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В.Г. Ефимов, Ю.Н. Ложкова, А.Г. Митин

Возможным путем совершенствования процедуры ультразвуковой (УЗ) локации является использование зондирующих импульсов такой формы, чтобы регистрируемый сигнал был максимально адаптирован к форме анализирующего вейвлета. В работе описана ультразвуковая система динамических измерений с использованием вейвлетной технологии для уменьшения погрешности определения текущего свода заряда ракетных двигателей твердого топлива.

**Ключевые слова:** УЗ сигнал, вейвлет-преобразование, адаптивная система.

### Введение

Предметом исследования является один из самых сложных видов неразрушающего контроля – контроль энергетических установок при их работе. Создание высокоинформативных систем контроля твердотопливных ракетных двигателей ориентировано на решение следующих задач:

- исследование изменений формы, толщины свода заряда и перемещения конструктивных элементов [1];
- оценку параметров скорости горения.

В настоящее время одним из наиболее развитых методов контроля и исследования внутрикамерных процессов в модельных и натуральных изделиях является ультразвуковой метод. В этом методе требуемая информация получается путем использования данных измерения какого-либо параметра взаимодействия акустических волн с измеряемым сводом, и последующей обработки.

Существующие УЗ системы ориентированы либо на временной анализ событий в зоне контроля, либо на определение скорости перемещения фронта горения в локальных участках на последних 100–150 мм свода горящего заряда [2]. Эти ограничения вызваны воздействием факторов, сопутствующих проведению УЗ локации изделий при их испытаниях:

- значительным (до 0,1 Нп/см) затуханием ультразвука;
- наложением в приемном преобразователе УЗ волн прошедших по корпусу, отраженных от промежуточных слоев и их интерференции;
- воздействием внешнего и внутреннего акустического шума;
- быстротечностью процесса горения, что, в свою очередь, исключает возможность

повышения отношения сигнал/шум за счет накопления и усреднения сигналов.

Многофакторность процессов, сопровождающих огневые испытания и влияющих на выходной сигнал, широкий спектр условий проведения УЗ зондирования позволяет лишь приблизительно прогнозировать эффективный диапазон работоспособности технических средств и алгоритмы последующей обработки. Так, например, наложение в приемном УЗ преобразователе эхо-импульсов, прошедших по корпусу и своду, обуславливает необходимость не технического, а программного решения задачи выделения и регистрации информативного участка сигнала.

В практике динамических измерений толщины объектов наибольшее применение находят алгоритмы обработки амплитуд и временного положения максимума сигнала [3]. Естественно отметить, что указанные алгоритмы эффективны при высоком отношении сигнал/шум и для достаточно стационарных сигналов. В реальных условиях маскирующее воздействие перечисленных выше факторов зачастую приводит к утрате временной информации, что обуславливает применение вейвлетных технологий обработки, которые обладают наилучшими фильтрационными свойствами [4].

### Теоретическая часть

Известно, что при прохождении УЗ сигнала через частотно-зависимую среду, происходит изменение его спектрального состава, а соответственно и формы. В результате этого изменения выходной сигнал оказывается неоптимальным к заложенной процедуре обработки (например, к выделению отсчетной координаты по максимуму, точке перехода через ноль и т.д.).

При исследовании крупногабаритных объектов с изменяющейся со временем тол-

щиной свода, необходимо знать, как изменяются форма и спектр ультразвукового сигнала в процессе его распространения. С другой стороны, применение вейвлетной технологии обработки обуславливает решение обратной задачи, т.е. формулирование требований к зондирующему сигналу, форма которого после прохождения через объект будет соответствовать форме анализирующего вейвлета.

Для обеспечения адаптивности УЗ системы необходимо, чтобы изменение формы зондирующего сигнала производилось динамически в процессе работы по оценке зарегистрированного сигнала. Степень и характер изменения формы зондирующего сигнала зависит от таких параметров информативной части зарегистрированного сигнала, как время первого вступления, положение главного максимума или минимума, последовательность максимумов или минимумов и т.д.

Схемы построения аппаратуры, осуществляющие в процессе исследования адаптивную автоматическую подстройку основных параметров электроакустического тракта и имеющие целью их оптимизацию, до настоящего времени активно не разрабатывались. Изделия из композиционных полимерных материалов с разнообразными акустическими свойствами обуславливают разработку нового поколения универсальной адаптивной аппаратуры. Очевидно, что решение этой задачи невозможно без применения микропроцессорной техники и программных средств управления параметрами электроакустического тракта.

В работе [5] проведены исследования, направленные на повышение разрешения в приборах ультразвуковой эхо-диагностики, позволяющие в пределах одного периода колебаний управлять формой зондирующего сигнала с частотой заполнения 3...4 МГц и достигнуто увеличение продольного разрешения на тестовых объектах за счет сокращения длительности зондирующего импульса.

Единственной публикацией, описывающей адаптивную систему УЗ контроля толщины полимерных композитных материалов, является [6], однако применяемые методы адаптации связаны только с подстройкой амплитуды и частоты зондирующих сигналов при их неизменной форме. В нашем случае необходимо управление формой зондирующих сигналов в широком диапазоне, которая не может быть реализована лишь подстройкой амплитуды и частоты.

### Постановка задачи

Для теоретического анализа искажений необходимо задать вид эхо-сигнала. Обычно для повышения точности измерений контроль ведется по первой или второй полуволне. Однако при проведении теоретического анализа представление сигнала в виде одного или двух полупериодов синуса не позволяет получить аналитические выражения для эхо-сигнала в процессе его распространения в среде с частотно - зависимым затуханием. В связи с этим был использован сигнал в форме волны, модулированной гауссианом:

$$\psi(t) = \exp\left(-\left(\frac{\Omega}{\omega_0}\right)\frac{t^2}{2} + i\Omega t\right), \quad (1)$$

где  $\Omega = 2\pi f$  – несущая частота излучения;

$\omega_0$  – безразмерный параметр разложения, имеющий смысл характерной частоты;  $i$  – мнимая единица.

Амплитуда сигнала для простоты выбрана равной единице. По существу выражение (1) описывает приведенный к реальному масштабу времени вейвлет Morlet. Кроме того, данный вейвлет является наиболее близким по форме к стандартному УЗ сигналу по ГОСТ 23702-90 (рисунок 1).

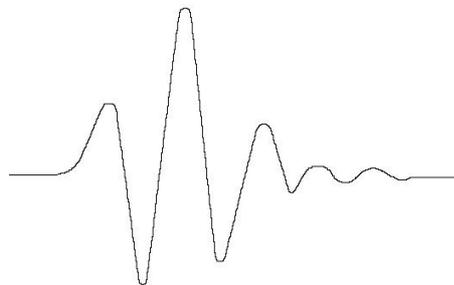


Рисунок 1 – Форма УЗ сигнала по ГОСТ 23702-90

Представим среду в виде четырехполосника с коэффициентом затухания  $K(\omega)$ :

$$K(\omega) = \exp\left(-\frac{\gamma\omega^2}{4\pi^2}\right),$$

где  $\gamma$  – удельный коэффициент затухания УЗ сигнала в среде;  $l$  – расстояние, пройденное УЗ сигналом в среде;  $\omega$  – круговая частота.

В результате моделирования определены следующие коэффициенты:

- уменьшения амплитуды сигнала  $K_u$  ;
- увеличения длительности  $K_\tau$  ;
- уменьшения частоты максимума огибающей спектра  $K_f$  .

## РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

Расчетные значения коэффициентов в зависимости от расстояния  $l$  при  $f = 50$  кГц;

$$\gamma = 5,5 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\Gamma_{\text{Ц}}^2 \cdot \text{м}}; \quad \omega_0 = 6 \text{ приведены в таблице 1. Значение коэффициента } \gamma \text{ определено экспериментально.}$$

Таблица 1 – Результаты моделирования

$l, \text{ м}$	0.1	0.2	0.5	0.75	1.0	1.5
$K_u$	3.84	11.5	167	871	3173	21472
$K_\tau$	1.037	1.073	1.17	1.253	1.327	1.463
$K_f$	1.076	1.152	1.38	1.57	1.76	2.14

При решении обратной задачи получено выражение для формы входного зондирующего сигнала, при прохождении которого через частотно-зависимую среду формируется выходной сигнал в виде вейвлета Morlet.

$$U_{\text{ex}}(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}}} \exp \left[ -\frac{\omega_0^2}{2} + \frac{\omega_0^2}{2 * \left( 1 - \frac{2\alpha l}{\omega_0^2} \right)} \right] \times \exp \left[ -\left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \frac{t^2}{2} - \frac{1}{1 - \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}} + \frac{i\Omega t}{1 - \frac{2\alpha l}{\omega_0^2}} \right],$$

где  $\alpha = \frac{\gamma \Omega^2}{4\pi^2}$ .

В результате анализа полученного выражения установлено, что при заданных начальных условиях входной сигнал физически реализуется при толщине объекта не более 50 м.

К числу подлежащих адаптации параметров контроля должны быть включены как параметры зондирующих сигналов, так и параметры практически всех элементов электроакустического тракта. К первым может быть отнесена несущая частота зондирующего сигнала, его длительность и период следования, закон модуляции амплитуды, частоты или фазы и т. п.

Ко вторым относятся коэффициенты передачи передающего и приемного трактов, резонансные частоты, полосы пропускания и диаграммы направленности излучающего и приемного электроакустических преобразователей и т.п. Другими словами, создание адаптивной аппаратуры означает переход от жесткой логики функционирования аппаратуры к гибкой.

### Практическая реализация

На основании проведенных исследований разработана структурная схема адаптивной ультразвуковой системы динамической толщинометрии, представленная на рисунке 2.

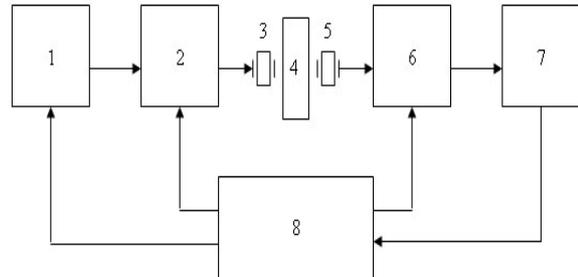


Рисунок 2 – Структурная схема адаптивной ультразвуковой системы

1 – генератор-формирователь управляющих воздействий; 2 – управляемый усилитель мощности; 3 – излучающий УЗ преобразователь; 4 – энергетическая установка; 5 – приемный УЗ преобразователь; 6 – управляемый входной усилитель; 7 – быстродействующий АЦП; 8 – ЭВМ с пакетом программ

Одними из ключевых блоков данной схемы являются ЭВМ с программным обеспечением обработки зарегистрированного сигнала и генератор-формирователь импульсов произвольной формы. Алгоритм работы такой адаптивной аппаратно-программной системы заключается в следующем.

На первом этапе ЭВМ 8 формирует первичный зондирующий сигнал из набора заданных сигналов, форма и параметры которого определяется оператором, исходя из априорных данных о структуре и параметрах контролируемого изделия. Кроме того, система устанавливает начальные параметры усилителей 2 и 6.

Далее информация о форме зондирующего сигнала в цифровом виде передается от ЭВМ в генератор 1, который выдает управляющее воздействие на усилитель 2 и далее на излучатель 3.

УЗ импульс, прошедший через объект контроля, регистрируется приемным преобразователем 5, усиливается усилителем 6, оцифровывается АЦП 7 и обрабатывается с использованием программного обеспечения персонального компьютера.

Обработка зарегистрированного сигнала заключается в определении его информативных параметров, с целью определения величины текущего свода. Информативные параметры зарегистрированного сигнала определяются из результатов анализа вейвлет-

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СИСТЕМА ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

спектра непрерывного вейвлет-преобразования. По величине текущего свода программно определяется форма зондирующего сигнала для следующей посылки из набора форм УЗ сигнала, хранящихся в памяти персонального компьютера. Выбранная форма сигнала записывается в генератор, который выдает ее на УЗ излучатель.

Центральным элементом системы является генератор-формирователь импульсов произвольной формы. Особенностью генератора является использование высокоточных цифровых синтезаторов частоты и малощумящего прецизионного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с микропроцессорным управлением. Это позволяет формировать выходные сигналы с высокой точностью. В таблице 2 представлены технические характеристики генератора-формирователя сигналов.

Таблица 2 – Технические характеристики генератора-формирователя сигналов

Максимальный выходной сигнал, мА	20
Шаг выходного сигнала, мА	0,08
Выходное сопротивление, кОм	100
Выходная емкость, пФ	5
Частота построения огибающей сигнала, кГц	100 – 1100
Шаг установки частоты огибающей, Гц	0,01396
Максимальная длина сигнала, отсчеты	256
Максимальная частота повторения сигнала, Гц	1000
Количество стандартных форм сигналов	16
Количество загружаемых форм сигналов	16

Зондирующие ультразвуковые сигналы имеют следующие характеристики:

- частоту от 30 кГц до 100 кГц;
- число периодов осцилляций (для сигналов осциллирующего вида) до 16;
- широкий класс форм сигналов, как осциллирующих, так и не осциллирующих (мандра, колокол и др.).

Входящий в состав генератора микроконтроллер ATmega103L тактируется от внешнего генератора с частотой 6 МГц и обеспечивает начальную установку параметров всех элементов схемы, управление элементами схемы, внешний ввод/вывод, обработку прерываний.

Определение локальной толщины свода заряда и скорости перемещения фронта горения проводится расчетным путем с использованием результатов измерений и геометрии зондирования. Для этого реализован зеркально-теневой метод [7] с измерением времени  $t_i$  прохождения УЗ импульса от поверхности корпуса изделия до фронта горения и обратно ( $i$  – номер отсчета). Толщина свода  $l_i$  в сечении, перпендикулярном оси изделия:

$$l_i = \sqrt{\left(\frac{Ct_i}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2},$$

где  $C = \frac{2h}{t}$  – скорость продольной УЗ волны;  $t$  – время прохождения траектории  $2h$ ;  $h = \sqrt{l_{нач}^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}$ ;  $l_{нач}$  – исходная толщина свода;  $L$  – расстояние между УЗ преобразователями.

#### Заключение

Применение адаптивной УЗ системы позволяет на основе решения обратной задачи формировать зондирующие импульсы, обеспечивающие минимальную погрешность выделения информативного признака эхосигнала при использовании вейвлетной технологии. Исследования направлены на учет искажений формы зондирующего импульса, что представляет принципиальный интерес для метрологической аттестации методик измерения текущей толщины свода, скорости горения, газопритока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов, В.Г. Использование метода радиационной визуализации для исследования внутрикамерных процессов в энергетических установках / В.Г. Ефимов, А.А. Назаров, М.А. Федоров, А.В. Финажин // Ползуновский вестник. – 2008. – №1–2. – С.16–19.
2. Коти, Ф. Ультразвуковой метод измерения скорости горения: ошибки, шумы, чувствительность / Ф. Коти, Ч. Ерейдес // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, № 1. – С. 59–67.
3. Перов, Д.В. Вейвлетная фильтрация сигналов ультразвукового дефектоскопа / Д.В. Перов, А.Б. Ринкевич, Я.Г. Смородинский // Дефектоскопия. – 2002. – № 12. – С. 3–21.
4. Хасегава, К. Новый метод измерения скорости горения твердого топлива с помощью ультразвука / К. Хасегава, К. Хори // Физика горения и взрыва, 2010. – Т.46. – № 2. – С. 79–87.

## РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ.

5. Качанов, В.К. Разработка ультразвуковых адаптивных методов и устройств для контроля изделий из полимерных материалов / В.К. Качанов, О.А. Казанцев, И.В. Соколов, А.Ю. Завьялов // Дефектоскопия.– 1989.– № 6.– С. 32–35.
6. Фомичев М.И. Система управления формой зондирующего импульса в приборах ультразвуковой диагностики / Дисс. канд. техн. наук.– М.: 2001.
7. Ефимов, В.Г. Ультразвуковой метод определения расхода в канальных изделиях

при двухстороннем истечении / В.Г. Ефимов, А.Г. Митин, А.П. Жуков // Утилизация ракетных двигателей на твердом топливе. Материалы Второй всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: ФНПЦ «Алтай», 2001. – С. 68–71.

*В.Г. Ефимов д.ф.-м.н., проф. Ю.Н. Ложкова, аспирант; А.Г. Митин к.т.н., доцент БТИ (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова; ФГУП «ФНПЦ «Алтай»», Бийск, тел: (3854)432331, e-mail: evg@bti.secna.ru*

УДК 681.518:620.173.262 (0.45)

### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ОБРАЗЦОВ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ ПРОДОЛЬНОГО ИЗГИБА

М.Ю. Локтев, А.Я. Суранов, Д.А. Ермолаев, В.Ф. Савин, В.А. Абанин

Рассмотрены вопросы разработки автоматизированной системы для измерения механических характеристик стеклопластиковых стержней круглого сечения, реализующей испытания методом продольного изгиба для контроля серийно выпускаемой продукции.

**Ключевые слова:** Автоматизированная измерительная система, стеклопластиковый стержень, сила, деформация, модуль упругости, продольный изгиб.

#### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются современными перспективными материалами, с расширяющейся областью применения в различных областях: энергетике, строительстве, нефтедобывающей, горном деле и других. Постоянно разрабатываются новые виды изделий из ПКМ и увеличиваются объемы производства.

Для обеспечения конкурентной способности продукции необходимо постоянно совершенствовать методы и средства контроля механических характеристик образцов из ПКМ, а именно, достоверность результатов испытаний и оперативность их получения. Достоверная информация о комплексе механических характеристик образцов актуальна для оптимального проектирования конструкций из ПКМ и расчета их эксплуатационной надежности. Из анализа известных видов испытаний механических характеристик образцов из ПКМ следует, что в настоящее время отсутствует метод и средство хорошо адаптированные к испытаниям стеклопластиковых образцов круглого сечения для контроля механических характеристик продукции в производственных условиях [1].

Стандартные методы испытаний (ГОСТ 25.601-80, ГОСТ 11262-80 – на растяжение, ГОСТ 25.602-80, ГОСТ 4651-82 – на сжатие, ГОСТ 25.604-82, ГОСТ 4648-71 – на статический изгиб, ГОСТ 9550-81 – определение модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе), не всегда позволяют с требуемой точностью оценить механические характеристики материала и изделий из них. Особенно это проявляется для образцов круглого сечения из анизотропных материалов. Более прогрессивным методом испытаний образцов с указанными свойствами является продольный изгиб, который может использоваться для контроля механических характеристик ПКМ, как при разработке новой продукции, так и при промышленном выпуске [1-5].

**Цель:** разработка автоматизированной измерительной системы (АИС) для контроля механических характеристик стеклопластиковых стержней круглого сечения методом продольного изгиба.

#### Задачи:

- обоснование структуры АИС и соответствующего аппаратного обеспечения;