

На правах рукописи



Ложкова Юлия Николаевна

**ВЕЙВЛЕТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ
КОНТРОЛЯ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийский технологический институт (филиал)

Научный руководитель **Ефимов Валерий Григорьевич**
доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Капранов Борис Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор кафедры физических методов и приборов контроля качества

Удод Виктор Анатольевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», профессор кафедры математических методов и информационных технологий в экономике

Ведущая организация Открытое акционерное общество
«Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск

Защита состоится «14» мая 2013 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан «8» апреля 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат технических наук, доцент

 Винокуров Б.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Энергетические установки (ЭУ) на твердом ракетном топливе из полимерных композиционных материалов (газогенераторы, разгонные блоки, ракетные двигатели) представляют собой специфический класс объектов контроля. Большие габариты, сложные внутрикамерные процессы обуславливают низкое отношение сигнал/шум при применении ультразвукового (УЗ), микроволнового (СВЧ) и радиационного методов, направленных на определение временных координат отраженных импульсов, толщины свода заряда и скорости его горения.

Огневые стендовые испытания (ОСИ) составляют важную часть наземных испытаний ЭУ, обеспечивают контроль работоспособности как отдельных элементов, так и всей установки, а получаемая информация является значимым фактором для совершенствования моделей предсказания внутренней баллистики. На этом этапе возникает широкий круг задач по изучению внутрикамерных процессов, которые проявляются через изменение конфигурации заряда ЭУ.

Актуальность вопроса определяется тем, что заряд должен иметь высокую гарантию качества на всех стадиях его жизненного цикла. Обеспечить надежную эксплуатацию и решить проблему увеличения ее срока возможно только при использовании методов неразрушающего контроля (НК), среди которых физические методы отвечают требованиям обеспечения высокой точности, дистанционности, безопасности, дешевизны, автоматизации обработки результатов испытаний.

Цель диссертационной работы заключается в разработке теоретических и прикладных подходов к обработке результатов НК, которые позволяют синтезировать вычислительные алгоритмы определения временного положения отраженных от поверхности горения зондирующих сигналов, направленные на максимальное снижение погрешности этого определения, а также в создании программного комплекса визуализации и обработки результатов применения физических методов исследования твердотопливных ЭУ на основе вейвлетных технологий.

Для достижения указанной цели исследованы возможности современной теории вейвлетов для обработки результатов НК, в частности, для выделения временного положения сигнала и выявления контуров радиационных изображений в присутствии шумов.

Задачи исследований:

- разработка методологии и алгоритмов обработки результатов УЗ и СВЧ толщинометрии, обеспечивающих точность определения временных координат сигналов, достаточную для решения практически важных задач обработки изделий;

- теоретическое исследование распространения УЗ сигнала через свод топливного элемента (ТЭ) толщиной не менее 600 мм в одном направлении, как в частотно-зависимой среде и установление закономерностей изменения его амплитудных и спектральных характеристик, что позволит обоснованно выбирать параметры электрического тракта системы;

- обработка результатов, предназначенных для восстановления конфигурации объекта по набору радиационных изображений и двумерном вейвлет-анализе, что позволит корректно применять процедуру многомасштабной обработки изображений с низким отношением сигнал/шум;

- разработка и применение критерия оценки эффективности метода определения временного положения эхо-сигнала, позволяющего оценить погрешность этого определения.

Методы исследований. В качестве теоретической базы автором использовались классические работы по теории вейвлетов S. Mallat, L.K. Meyer, C. Torrence, G.P. Compo, I. Daubechies и др., работы отечественных авторов Н.М. Астафьевой, А.В. Давыдова, Л.В. Новикова, А.П. Петухова и др., а также результаты по требованиям к масштабирующим функциям, исследованные G. Strang, D.X. Zhou.

Научная новизна определяется тем, что впервые проведены исследования по применению вейвлет-анализа результатов НК с использованием ультразвукового и микроволнового методов (одномерный случай) и при обработке радиационных изображений (двумерный случай), в частности:

- созданы теоретические основы разработки алгоритмов построения новых базисных функций вейвлет-преобразования применительно к задачам УЗ и СВЧ толщинометрии, позволяющие снизить погрешность определения временного положения эхо-сигнала по сравнению с известными вейвлетами;

- разработан метод определения временного положения эхо-сигналов по максимуму энергетического вейвлет-спектра, с использованием в качестве базисных функций стандартного ультразвукового сигнала, импульса Берлаге, а также базисных вейвлетов Morlet и Mhat;

- впервые предложен критерий оценки эффективности данного метода определяющий вероятность того, что погрешность определения временного положения сигнала не превысит половины длины периода колебания исследуемого сигнала;

- создан способ обработки радиационных изображений, основанный на согласовании структуры изображения, типа вейвлета и ограничении толщины выделяемого контура не более величины свода, сгорающего за секунду, что позволяет корректно применять процедуру многомасштабной обработки без внесения погрешностей в дальнейшие расчеты;

- предложена методология проектирования адаптивной ультразвуковой системы, в которой формирование зондирующего сигнала в виде комбинации вейвлетообразных структур направлено на повышение точности определения временного положения сигнала.

Практическая значимость:

- создан специализированный программный продукт обработки результатов контроля на основе вейвлетных технологий, обеспечивающий выделение и регистрацию временных координат заряда на фоне мощного широкополосного шума;

- на основе модельного сравнения выявлены преимущества синтезированных базисов по сравнению с известными при определении временного положения сигнала с учетом неунимодальности распределения погрешности;

- установлено, что использование предложенного подхода определения времени прихода зондирующего сигнала, отраженного от поверхности горения, по максимуму энергетического вейвлет-спектра позволяет снизить погрешность определения координаты эхо-импульса в 2...3 по сравнению с известными вейвлетами;

- установлено преимущество вейвлетной обработки радиационных изображений внутренней структуры изделия при отношении сигнал/шум менее 10, что характерно для большинства практических случаев.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются при обработке результатов ультразвукового контроля изделий в ОАО «ФНПЦ «Алтай» и в учебной практике факультета информационных технологий, автоматизации и управления Бийского технологического института в курсах «Методы неразрушающего контроля», «Алгоритмы и методы обработки информации». По данным курсам совместно с автором разработаны учебные пособия и методические рекомендации. По курсу «Методы неразрушающего контроля» учебное пособие издано с рекомендацией Сибирского регионального учебно-методического центра высшего профессионального образования для межвузовского использования в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по специальности 200106 «Информационно-измерительная техника и технологии».

Личный вклад автора. Автор принимал непосредственное участие в постановке цели и задач исследований, разработке этапов создания вейвлетных базисов, расчете коэффициентов вейвлет-преобразования, интерпретации и анализе полученных теоретических результатов, в сопоставлении их с известными экспериментальными данными, а также в создании и адаптации предложенного в работе критерия эффективности представленного метода определения максимума вейвлет-спектра к конкретным исследовательским задачам.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских научных конференциях «Информационные технологии в экономике, науке и образовании» (г. Бийск, 2009, 2010, 2011); Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (г. Бийск, 2009); Международной научной конференции «Становление и развитие научных исследований в высшей школе», посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева (г. Томск, 2009); Международных конференциях-семинарах по микро/нанотехнологиям и электронным приборам EDM'2010, 2011, 2012 (г. Новосибирск); Всероссийских научно-технических конференциях «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2010, 2011, 2012 (г. Бийск); I Всероссийской научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле с международным участием SibTest 2011 (г. Томск).

Исследования проводились при поддержке Гранта Российского фонда фундаментальных исследований по конкурсу «Инициативные научно-исследовательские проекты» – проект № 12-07-00164 «Разработка информационных технологий обработки результатов применения физических методов исследования крупногабаритных твердотопливных ракетных двигателей (РДТТ)»; НИР – регистрационный номер № 01201260735; стипендии Правительства РФ студентам и аспирантам очной формы обучения образовательных учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлениям подготовки (специальностям), соответствующим приоритетным направлениям модернизации и технологического развития российской экономики (приказ Минобрнауки РФ № 154 от 28 февраля 2012 г.); в рамках Федеральной целевой научно-технической программы «Информационные технологии обработки результатов неразрушающего контроля крупногабаритных изделий» на 2009–2014 годы; номер гос. регистрации 01.2.00900895, код ГРНТИ 519.711.3, 50.41.25.

На защиту выносятся:

- методическая база обработки результатов НК энергетических установок из полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе применения вейвлетных технологий при исследованиях с использованием ультразвукового и микроволнового методов толщинометрии;

- результаты практического использования специализированного программного комплекса обработки с возможностью гибкого перебора вейвлетных алгоритмов в пределах обработки результатов одного испытания;

- метод построения базиса вейвлет-преобразования на основе функции с нулевым первым моментом, хорошо адаптированной к форме эхо-сигнала;

- метод выделения информативного признака исследуемого сигнала по максимуму энергетического вейвлет-спектра при обработке измерительной информации и необходимости адаптации анализа к конкретной задаче;

- выделение контуров радиационного изображения вейвлетными функциями, тип которых определяется структурой изображения и отношением сигнал/шум.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 работ, в том числе 1 монография, 3 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ, 1 статья в зарубежном издании (импакт-фактор журнала по Web of Science 0,827).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и результатов, списка использованных источников. Работа изложена на 168 страницах машинописного текста, включает 6 таблиц, 55 рисунков, 2 приложения. Список использованной литературы содержит 118 наименований.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.ф.-м.н. Ефимову В.Г. – за помощь на протяжении выполнения всей работы. Автор благодарит к.ф.-м.н. Александровича В.М. – за помощь и консультации по вопросам, связанным с численными оценками эффективности предложенных в работе алгоритмов обработки данных, д.ф.-м.н. Новикова Л.В., д.ф.-м.н.

Астафьеву Н.М. – за ценные замечания и рекомендации по применению аппарата вейвлет-анализа, к.т.н. Митина А.Г. – за внимание и поддержку работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности, научной и практической значимости работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, изложены основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика выполненной работы.

Первый раздел, носящий обзорный характер, посвящен изложению основных сведений об уровне развития и задачах создания методов исследования внутрикамерных процессов в энергетических установках, а также способах обработки и представления результатов испытаний. Проведен анализ исследований отечественных и зарубежных ученых, ведущее место в которых занимают фирмы Франции (ONERA, SNPE, CAEPF). На основе проведенного анализа показано, что специфика исследования крупногабаритных твердотопливных ЭУ обуславливает применение методов, где в качестве носителя информации используются проникающие излучения, а в качестве методической базы обработки результатов испытаний – теории вейвлет-преобразования.

В настоящее время наиболее развитыми методами являются микроволновый, ультразвуковой и радиационный методы. Отражением этого факта является значительный объем публикаций по применению методов при исследовании горения образцов наполнителя и в модельных малогабаритных ЭУ с толщиной свода ТЭ до 100-150 мм. Многолетние исследования в данной области позволили достигнуть погрешности определения скорости горения около 2 % (в перспективе до 1 %) в УЗ методе и 3...4 % (в перспективе до 2 %) в микроволновом методе.

В разделе показано, что сложный характер исследуемых сигналов, вызванный в т.ч. наличием интерференционных явлений приводит к тому, что существующая методическая база, основанная на корреляционных процедурах и Фурье-анализе, не позволяет проводить эффективную обработку и представление результатов ОСИ твердотопливных ЭУ с толщиной зондируемого свода от 600 мм. Это обуславливает необходимость создания специализированных программных комплексов моделирования и обработки результатов толщинометрии, основанных на использовании вейвлетных технологий.

Во втором разделе работы дана общая характеристика вейвлет-анализа как математического аппарата, представлены результаты вейвлет-анализа радиационных изображений внутренней структуры изделия и метод построения базисной функции вейвлет-преобразования эхо-сигналов.

Для проведения внутрибаллистических расчетов по итогам визуализации необходимо иметь уравнения (координаты) контуров, образующих границу заряда в каждый момент времени. Большинство известных методов выделения контуров реализованы на базе дифференциально-разностных или иных линейных операторов с последующим сравнением с порогом. Результатом

является снова изображение, но уже имеющее два уровня яркости. Задачей проводимых исследований является получение не изображения, а линии на плоскости. Поэтому в основе подхода к обработке положен геометрический анализ формирования контуров на экране.

При рассмотрении особенностей изделий, как объектов исследования, основным информативным признаком, определяющим выявляемость контуров, является контраст и отношение сигнал/шум. Для случая визуализации малогабаритных изделий эти параметры достаточно высоки, что и предопределило высокую точность определения координат контуров. Применительно к крупногабаритным изделиям задача значительно усложняется.

Представленный в работе способ обработки, основан на согласовании структуры изображения и типа вейвлета и ограничении толщины выделяемого контура не более величины свода, сторающего за секунду, что позволяет корректно применять процедуру многомасштабной обработки без внесения погрешностей в дальнейшие расчеты.

Далее в разделе представлен метод построения базисной функции эхо-сигнала.

Вейвлет-преобразование сигнала имеет в обозначениях работы С. Torrence, G.P. Compo [Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, № 1, V.79, P.61] следующий вид:

$$W_{\psi}(k, j) = \sum_{n=0}^{N-1} f_n \cdot \psi^* \left[\frac{(n-k)dt}{s_j} \right], \quad (1)$$

где f_n – отчеты анализируемого сигнала; N – количество отчетов; k – определяет положение вейвлета на оси времени, $k=0..N$; s_j – числа, называемые масштабами преобразования; ψ – вейвлет-функция; * – обозначает комплексное сопряжение.

Обычно $s_j = 2dt \cdot 2^{jdj}$, $j = 0, 1, \dots, \frac{1}{dj} \log_2 \left(\frac{N}{2} \right)$, dj – логарифмический шаг изменения масштаба.

Чем меньше значение масштаба, тем более четкое представление об исследуемом сигнале можно получить и тем большее количество вычислений придется выполнить. Для практики обычно достаточно выбрать значение dj в интервале 0,125...0,5.

Формирование вейвлет-функции по масштабам осуществляется по следующему выражению:

$$\psi(t) = \psi_0(t) \cdot \sqrt{\frac{dt}{s}}, \quad \text{где } \psi_0(t) \text{ – базисный вейвлет.}$$

При выполнении преобразования (1) необходимо, чтобы базисный вейвлет удовлетворял следующим условиям:

1. Локализация. Вейвлет-преобразование, в отличие от преобразования Фурье, использует базисную функцию, которая должна быть локализована и во временном пространстве и по частоте.

2. Нулевое среднее:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_0(t) dt = 0.$$

3. Нормированная энергия:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_0^2(t) dt = 1.$$

Следует отметить, что при конструировании вейвлетного базиса также необходимо учитывать условие соответствия вейвлетного базиса теореме Калдерона, Гроссмана, Морле, при не выполнении которой анализирующая функция превращается в обычный дифференцирующий фильтр.

Результатом вейвлет-преобразования является двумерный массив коэффициентов $W(k, j)$ или вейвлет-спектр обрабатываемого сигнала. Энергетический вейвлет-спектр $E(k, j) = |W(k, j)|^2$, показывающий распределение энергии процесса как во времени, так и по масштабам, более удобен для анализа, чем вейвлет-спектр, представляющий собой в общем случае массив комплексных чисел.

Зона достоверности определяет область, вне которой коэффициенты вычисляются по отрезкам, выходящим за границы временного ряда, при этом с ростом масштаба разложения все больше коэффициентов становятся недостоверными (рисунок 1).

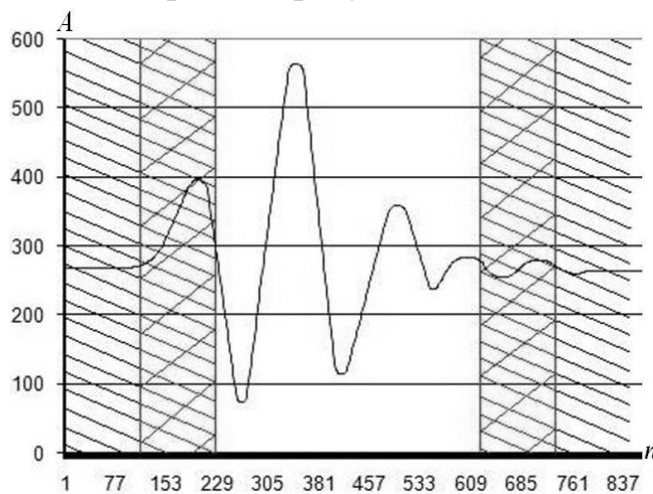


Рисунок 1 – Зона достоверности восстановленного УЗ сигнала на выбранном масштабе

Поскольку вейвлет-преобразование представляет собой скалярное произведение анализируемого сигнала на трансформации (сдвиг, масштабирование) базисной функции, очевидно, что значения коэффициентов спектра достигнет максимума, если при некоторых значениях индексов k, j вейвлет функция и полезный сигнал совпадут (или будут достаточно близки по форме). Это означает, что расположение максимального

значения спектра на оси ординат соответствует тому значению масштаба s , при котором частота заполнения эхо-импульса приблизительно равна частоте колебаний базисной функции, а временная координата максимума является моментом прихода эхо-сигнала. На рисунке 2 приведен спектр суммы модельного УЗ сигнала по ГОСТ 23702-90 и гауссова некоррелированного шума.

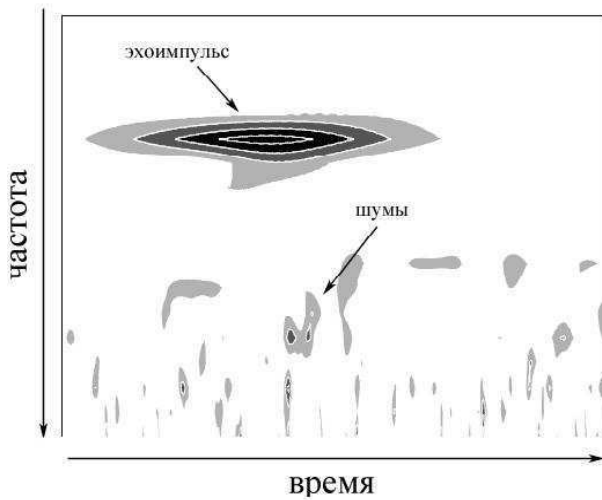


Рисунок 2 – Вейвлет-спектр зашумленного УЗ сигнала при отношении шум/сигнал, равном 1

Исходные данные представлены функцией дискретного времени $g(t_k)$. В результате интерполяции данных получается функция $g(t)$, которая в общем случае не может являться базисной функцией преобразования из-за указанных выше ограничений. С достаточной для целей нашего исследования точностью эти ограничения можно удовлетворить следующими последовательными преобразованиями:

- нулевое среднее обеспечивается путем вычитания из $g(t)$ его среднего значения:

$$\phi_1(t) = g(t) - \bar{g}(t);$$

- нормирование энергии:

$$\phi_2(t) = \frac{\phi_1(t)}{\|\phi_1(t)\|_2}, \quad \text{где } \|\phi_1(t)\|_2 = \sqrt{\int_0^T \phi_1^2(t) dt}, \quad T - \text{время наблюдения};$$

- локализованность во времени:

$$\phi_3(t) = \phi_2(\tau t + t_0),$$

где τ – интервал времени убывания огибающей функции $g(t)$ в e^2 раз (e -folding time), t_0 – положение нуля аргумента вейвлетной функции.

Локализованность по частоте обеспечивается тем, что спектр УЗ сигнала сосредоточен в узкой полосе около частоты заполнения импульса. Количественным показателем зоны является время спада (e -folding time). Этот показатель определяется как временной интервал, на краях которого энергия сигнала уменьшается в e^2 раз. Время спада определяется через функцию автокорреляции $\psi(\tau)$ между материнской функцией $\psi\left(\frac{t}{s}\right)$ и ее копией,

сдвинутой на время спада $\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$:

$$\psi(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t}{s}\right) \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt.$$

В результате расчетов функции установлено отличие времени спада от теоретического значения в 2 раза для вейвлетов Morlet и Mhat, описанных в классической работе С. Torrence, G.P. Combo.

Проведенные исследования позволяют расширить диапазон масштабов вейвлет-разложения, следовательно, повысить точность восстановления и эффективность фильтрации исходных данных.

Окончательно формула преобразования функции $g(t)$ в базисную функцию может быть записана в следующем виде:

$$\psi(t) = \frac{g(\tau t + t_0) - \bar{g}(t)}{\sqrt{\int_0^T (g(\tau t + t_0) - \bar{g}(t))^2 dt}}$$

Для моделирования выбран УЗ сигнал по ГОСТ 23702-90, который зашумлялся, а затем определялось его временное положение при помощи вейвлет-преобразования на основе различных базисных функций.

С помощью описанного выше алгоритма построены два базиса: один непосредственно из незашумленного исследуемого сигнала, другой на основе широко применяемого в УЗ толщинометрии импульса Берлаге $f(t) = t^a e^{-bt} \sin(ct)$. В качестве классических выбраны вейвлеты Morlet с эквивалентной частотой $\omega_0 = 6$ и Mhat.

Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

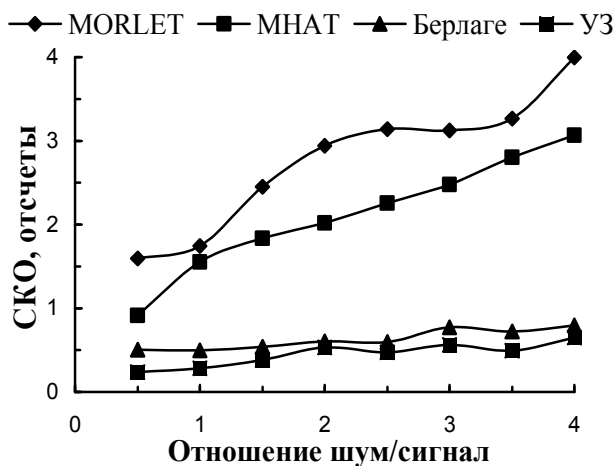


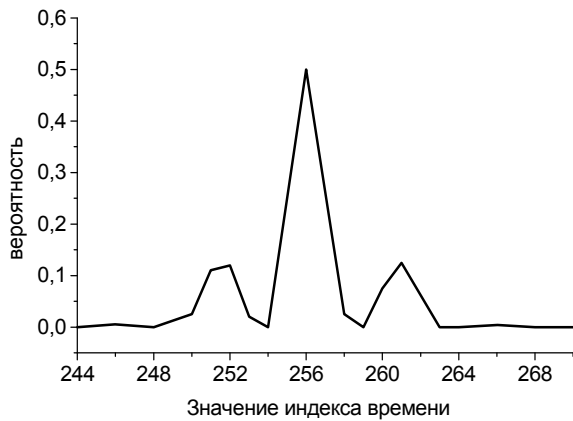
Рисунок 3 – Зависимость СКО от отношения шум/сигнал

Полученное значение среднеквадратического отклонения (СКО) хорошо характеризует устойчивость применяемого метода к шумам различной амплитуды. Применение построенных базисных функций позволяет снизить погрешность, вызываемую внешними случайными импульсными шумами.

Третий раздел посвящен вопросу устойчивости оценки временного положения сигнала и принятому критерию эффективности оценки его временного положения.

Анализ структуры ошибки определения временного положения показал, что распределение вероятности этой ошибки не является унимодальным и может иметь несколько побочных максимумов, отстоящих на значительном расстоянии от главного. В этом случае, несмотря на незначительное значение СКО, существует значительная вероятность появления больших ошибок (рисунок 4).

Предложенный метод обработки заключается в определении максимума вейвлет-спектра. При постоянной или медленно меняющейся толщине свода заряда применение временного стробирования позволяет уйти от побочных максимумов, если вероятность появления этих максимумов невысока. При непрогнозируемом (в т.ч. скачкообразном) изменении толщины свода заряда применение временного стробирования становится неприемлемым, т.к. в этом случае достаточно сложно разделить сбойные значения погрешности и скачкообразные изменения толщины.



Индекс 256 соответствует действительному положению максимума

Рисунок 4 – Плотность вероятности ошибки

Это обуславливает применение других критериев эффективности свойств предложенного метода.

В качестве простого и хорошо характеризующего эффективность метода определения временного положения сигнала критерия предлагается использовать величину, которая названа устойчивостью.

Под устойчивостью метода будем понимать вероятность того, что погрешность определения временного положения сигнала не превысит некоторого значения:

$$k_E = P \left(\left| t - t^* \right| < E \right), \quad (2)$$

где t – временное положение сигнала, полученное с использованием какого-либо метода; t^* – истинное значение временного положения сигнала; E – длина временного интервала.

В качестве опорных функций использованы УЗ сигнал по ГОСТ 23702-90 и функция Берлаге.

Рисунок 5 иллюстрирует результаты моделирования при совпадении опорной функции и сигнала.

При отношении сигнал-шум большем 4 результаты применения вейвлет-преобразования с неоптимальным базисом имеют большую вероятность ошибки, чем простая процедура выделения максимума амплитуды сигнала, что свидетельствует о необходимости разграничения областей применения вейвлет-анализа и традиционных методов. Устойчивости корреляционного метода и вейвлет-анализа с использованием оптимального базиса примерно совпадают, что явилось ожидаемым результатом вследствие использования в обоих методах интегральной свертки и совпадения подставляемых в нее функций.

Для исследования чувствительности корреляционного метода и метода на основе вейвлет-преобразования к изменению принимаемого сигнала проведено моделирование, когда сигнал имеет отличную от опорной функции частоту и форму огибающей (рисунок 6).

Выделяемым сигналом является функция Берлаге с параметрами ($a = 2,7; b = 1, c = 3,5$), для функции опорного сигнала используются параметры ($a = 2,3; b = 1,2; c = 3$).

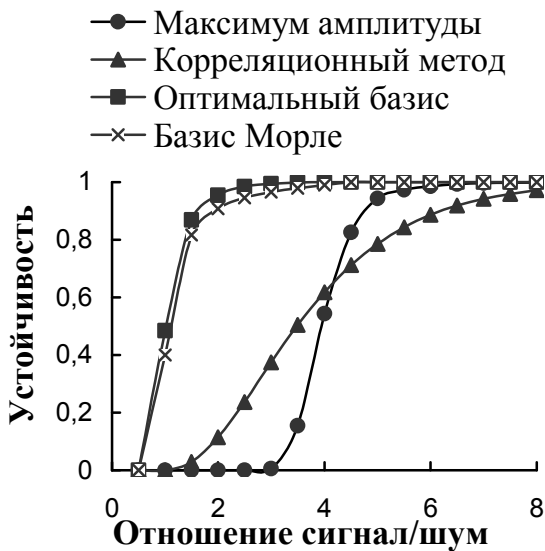


Рисунок 5 – Зависимость устойчивости различных методов от отношения сигнал-шум

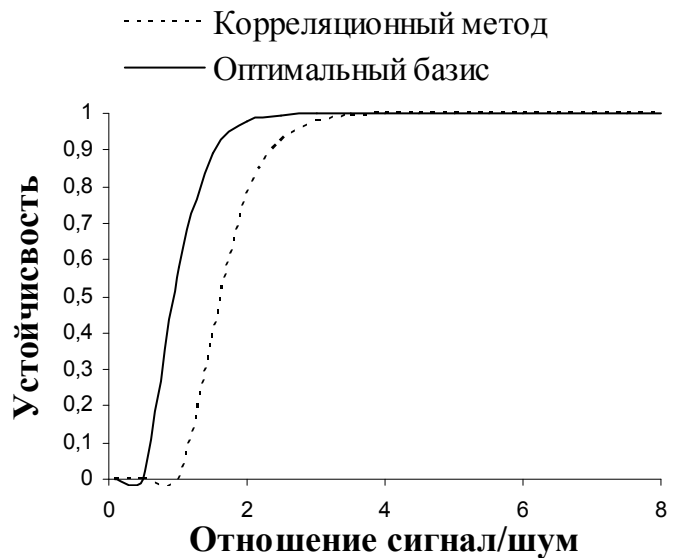


Рисунок 6 – Сравнение методов при отличии опорного и выделяемого сигналов от отношения сигнал/шум

Предложенный метод позволяет снизить погрешность определения временного положения эхо-импульса при низких соотношениях сигнал-шум (менее 3) и наличии искажений сигнала при прохождении через объект исследования по сравнению с ранее использовавшимися методами.

В четвертом разделе представлены результаты применения вейвлет-анализа для микроволнового метода измерения скорости горения.

При движении фронта горения вследствие непрерывного изменения фазы отраженной волны, выходной сигнал датчика скорости изменяется по синусоидальному закону. Основными информативными параметрами сигнала, используемыми для расчета скорости горения, являются период колебаний, моменты времени образования плазменного фронта и окончания процесса горения на осциллограмме, число полных колебаний.

Выражение для плоской волны, распространяющейся в одном направлении в однородном и изотропном неидеальном диэлектрике, имеет вид:

$$H = H_m \exp[i(\omega t - kz)] .$$

Прямое выделение мнимой части из данного выражения сопряжено со сложностями, поэтому воспользуемся другим подходом.

Представим $k = k_1 - ik_2$, следовательно:

$$H = H_m \exp[i(\omega t - k_1 z)] \exp(-k_2 z) , \quad (3)$$

тогда k_2 – коэффициент затухания.

Из определения k и осуществления преобразования получим:

$$k_1 = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \epsilon_a^2}}} , \quad k_2 = \frac{\omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}}{\sqrt{2}} \sqrt{-1 + \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \epsilon_a^2}}} ,$$

где ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость, Ф/м; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, Гн/м; γ – проводимость, (Ом·м)⁻¹.

При значениях $\gamma = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ (Ом·м)⁻¹, $\omega \approx 3 \cdot 10^{10}$ Гц членом с γ можно пренебречь в выражении для k_1 , а k_2 разложить по малому параметру:

$$k_1 = \omega \sqrt{\mu_a \varepsilon_a}, \quad k_2 = \frac{\omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}{\sqrt{2}} \frac{\gamma}{\sqrt{2} \omega \varepsilon_a} = \frac{\gamma}{2} \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}.$$

Переходим к относительным значениям проницаемостей:

$$k_1 = \frac{\omega}{c} \sqrt{\mu \varepsilon}, \quad k_2 = 60 \pi \gamma \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}},$$

где c – скорость света.

Для исследуемых составов, значения μ и ε очень близки к единице. После подстановки значения k_1 в выражение (3) получаем:

$$H = H_m \exp \left[i \omega \left(t - \frac{z}{c} \sqrt{\varepsilon} \right) \right].$$

Изменение ε с давлением можно оценить из формулы $\varepsilon = 1 + \beta N$, где β – поляризуемость одной молекулы, N – число молекул в единице объема.

При $P_0 = 0,1$ МПа, $T_0 = 25$ °С, для азота $\varepsilon_0 = 1,000528$. Из условия $P = NkT$ получим:

$$\varepsilon = 1 + \beta N_0 \frac{N}{N_0} = 1 + (\varepsilon_0 - 1) \frac{PT_0}{P_0 T}.$$

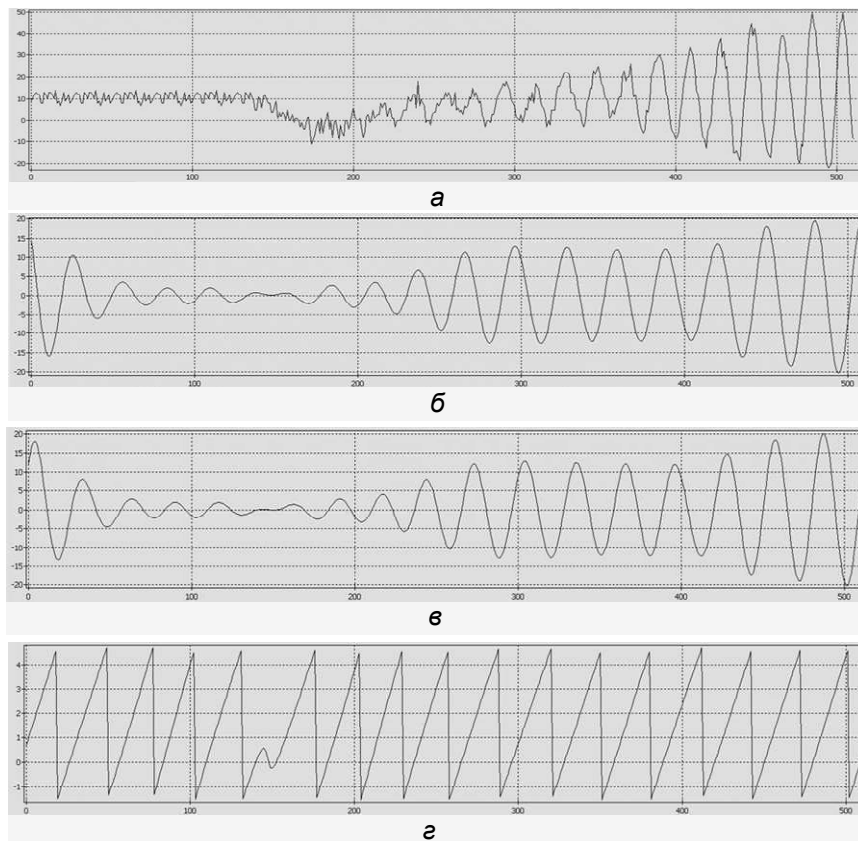
При увеличении давления до 5 МПа и неизменной температуре $\sqrt{\varepsilon} = 1,3$ %, что и является погрешностью определения z – границы отражения от фронта горящего образца.

Экспериментально установлено, что выходной сигнал датчика характеризуется высоким уровнем шумов, изменением амплитуды колебаний, нестабильностью уровня условного нуля. В результате возникает методическая погрешность, которая проявляется как погрешность определения временных интервалов.

Из-за нестационарности характеристик доплеровского сигнала традиционные методы улучшения сигнала, такие как оптимальная фильтрация, которая уменьшает шум, минимизируя среднеквадратичную ошибку, оказываются не эффективны. При этом использование вейвлетной технологии позволяет минимизировать среднеквадратическую ошибку без появления в обработанном сигнале дополнительных частотных компонент.

Рисунок 7 иллюстрирует уменьшение погрешности определения периодов колебаний по экстремумам осциллограммы.

В соответствии с методикой обработки для расчета скорости необходима точная локализация момента начала и конца горения. Момент начала сопровождается деформацией образца и изменением фазы отраженного сигнала.



а – исходный сигнал;
 б, в – действительная и мнимая части восстановленного сигнала;
 г – фазовая характеристика вейвлет-преобразования
 Рисунок 7 – Результаты обработки

Для извлечения информации о фазе сигнала был использован комплексный вейвлет Morlet и получена фазовая характеристика на одном из масштабов разложения, позволяющая локализовать момент начала горения (рисунок 7 г).

Полученные результаты показывают, что микроволновый метод, а также реализованные процедуры обработки позволяют фиксировать значение и характер изменения скорости горения с погрешностью до 2 % при воздействии различных дестабилизирующих факторов. Это позволяет сделать вывод о возможности прогнозирования закономерностей горения топлива в различных устройствах.

В пятом разделе приводятся результаты применения вейвлетных технологий в УЗ толщинометрии.

В начале раздела представлен вариант ультразвукового эхо-метода определения скорости горения по своду ТЭ. В плане реализации метода решались две основные задачи. Первая задача связана с созданием комплекса технических средств, обеспечивающих зондирование ЭУ и регистрацию отраженных сигналов. Выбор технических характеристик элементов комплекса проведен на основании результатов моделирования распространения ультразвука в ТЭ, как частотно-зависимой среде. Второй, наиболее сложной задачей, связанной с реализацией метода, является разработка программного комплекса, обеспечивающего автоматизированную

обработку результатов регистрации. В основе решения этой задачи лежит необходимость точной временной локализации координаты информативного участка эхо-сигнала.

Для правильного расчета и проектирования УЗ системы, ориентированной на прозвучиваемую толщину свода ТЭ не менее 600 мм в одном направлении, необходимо знать, как изменяется форма и спектр ультразвукового сигнала в процессе его распространения.

Для теоретического анализа искажений необходимо задать вид эхо-сигнала. Обычно для повышения точности измерений временной координаты, 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 была использована модель эхо-сигнала в виде плоской волны, модулированной функцией Гаусса:

$$U(t) = \exp \left[- \left(\frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2 \frac{t^2}{2} + j\Omega t \right], \quad (4)$$

где $\Omega = 2\pi f_{изл}$ – несущая частота излучения; ω_0 – безразмерный параметр разложения, имеющий смысл характерной частоты; j – мнимая единица.

Амплитуда сигнала для простоты выбрана равной единице. По существу выражение (4) 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.

В результате проведенных теоретических исследований искажений сигнала при его распространении в среде с частотно-зависимым затуханием получены расчетные значения коэффициентов:

- изменения амплитуды максимума выходного сигнала к входному (k_u);
- изменения длительности выходного сигнала к входному (k_τ);
- изменения ширины спектра сигнала (k_ω);
- изменения частоты максимума огибающей спектра (k_f)

в зависимости от расстояния l при $f_{изл} = 50 \text{ кГц}$, $\alpha = 13,7 \frac{1}{\text{м}}$, $\omega_0 = 6$ (таблица 1). Значения коэффициента затухания α определены экспериментально.

Таблица 1 – Расчетные значения коэффициентов

$l, \text{ м}$	0,1	0,2	0,5	0,75	1,0	1,5
k_u	3,84	11,5	167	871	3173	21472
$k_\tau = k_\omega$	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

Проведенные исследования послужили основой для проектирования перспективного метода исследования внутрикамерных процессов. В разделе представлено применение вейвлетных технологий в адаптивной ультразвуковой системе для исследования ЭУ. Суть данного подхода заключается в использовании зондирующих сигналов такой формы, чтобы регистрируемый сигнал имел форму, максимально адаптированную к форме базисной функции.

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.

На основании проведенных исследований разработана модель адаптивной ультразвуковой системы динамической толщинометрии, направленной на повышение точности определения информативных параметров сигнала (рисунок 8).

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

В качестве управляющего комплекса 8 может использоваться ПЭВМ, либо комплекс из управляющих микроконтроллеров и сигнального процессора. При моделировании в качестве управляющего комплекса использован макет, состоящий из ПЭВМ, сигнального процессора ADSP-21375BSWZ-2B и отладочной платы ADSZ-21375-EZLITE.

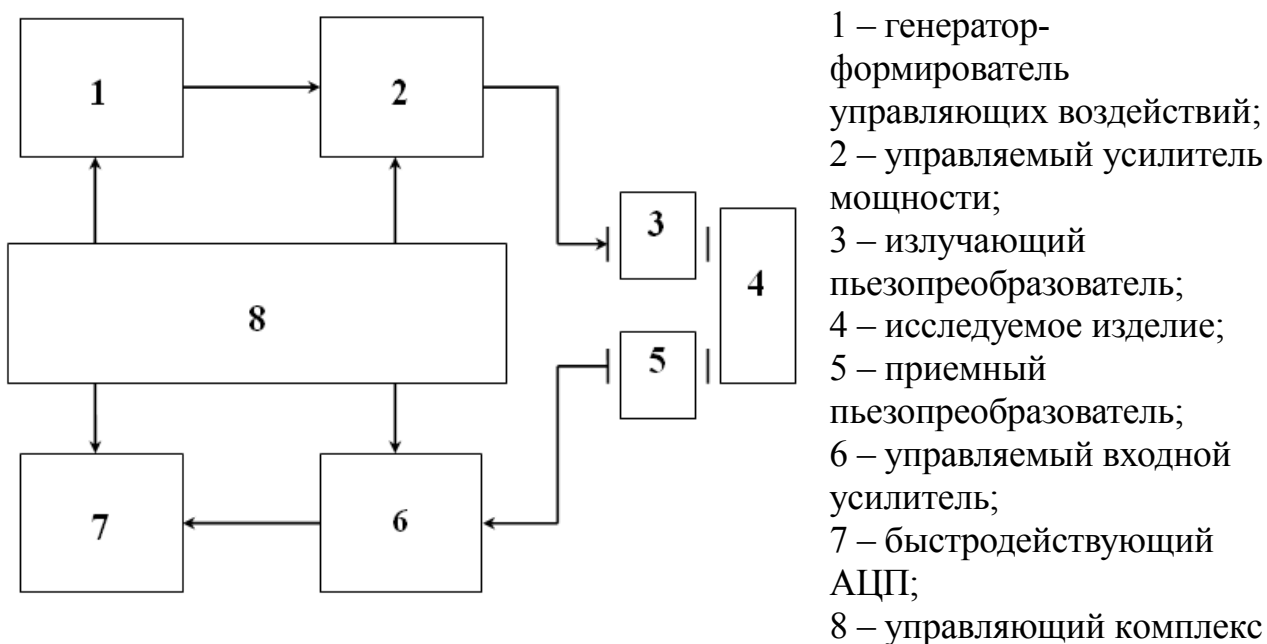


Рисунок 8 – Структурная схема адаптивной системы

На первом этапе управляющий комплекс 8 формирует первичный зондирующий сигнал из набора заданных сигналов, форма и параметры

которого определяется оператором, исходя из априорных данных о структуре и параметрах исследуемого изделия. Кроме того, система устанавливает начальные параметры усилителей 2 и 6.

Далее информация о форме зондирующего сигнала в цифровом виде передается от управляющего комплекса 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 времени прихода отраженного сигнала, с целью определения толщины свода. Время прихода зарегистрированного сигнала определяется из результатов анализа вейвлет-спектра непрерывного вейвлет-преобразования.

По толщине 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.

Разработана программная модель адаптивной системы. Структура программы представлена на рисунке 9. Основой модели является блок обработки сигналов, в котором реализованы функции генерации сигналов различных видов, функции генерации и анализа отклика. Для расчётов используется математический аппарат, реализованный во вспомогательном модуле. Для работы с шаблонными сигналами используется модуль библиотеки сигналов. Взаимодействие программы с пользователем и файловой системой реализовано в модулях графического интерфейса и работы с файлами.

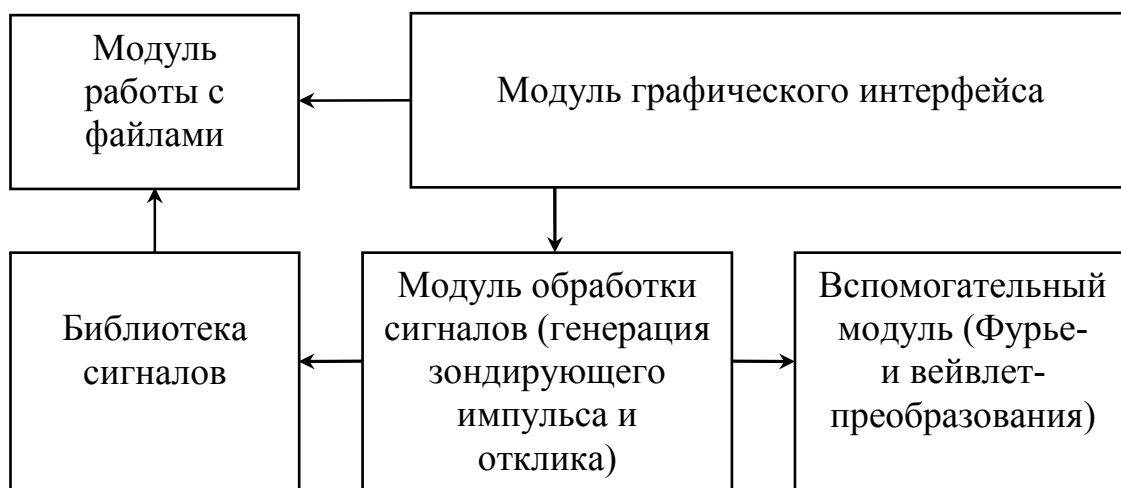


Рисунок 9 – Структура программной модели

Программная модель позволяет учитывать требуемую частоту сигнала отклика и коэффициент затухания среды. Также модель позволяет задавать частоту дискретизации, временной интервал для сигнала, вид сигнала.

Определение локальной толщины свода заряда и скорости перемещения фронта горения проводится расчетным путем с использованием результатов измерений и геометрии зондирования. Для этого реализован зеркально-

теневого метод 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.

Применение адаптивной УЗ системы позволяет на основе решения обратной задачи формировать зондирующие импульсы, обеспечивающие минимальную погрешность выделения временного положения эхо-сигнала 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, газоприхода.

В заключении раздела представлен разработанный программный комплекс вейвлетной обработки результатов исследований волновыми методами. Особенностью реализованного в работе подхода является:

- использование библиотеки как стандартных вейвлетов, так и синтезированных;
- определение масштаба разложения, на котором сигнал имеет максимальную энергию;
- учет зоны недоверности;
- возможность изменения параметров преобразования (дискретность выбора отсчетов, частота дискретизации, перевод вейвлетного масштаба в Фурье-частоту).

Разработанный программный продукт реализует непрерывное вейвлет-преобразование одномерных сигналов по алгоритму, описанному в теоретической работе Torrence C., Compo G.P. и состоит из трёх основных модулей: модуль загрузки/сохранения файлов, модуль с процедурами вейвлет-преобразования и модуль основного интерфейса. Два дополнительных модуля реализуют графическое построение сигналов и трехмерную визуализацию.

Программный комплекс реализован в диалоговом режиме, что позволяет выбирать коэффициенты фильтрации и сглаживания с учетом допустимых искажений временной информации и априорных ограничений по физике регистрируемых процессов. Все программы могут обмениваться входными и выходными параметрами между собой, что позволило создавать автоматизированную систему обработки данных СВЧ и УЗ зондирования. В результате обеспечено повышение эффективности обработки результатов, благодаря возможности гибкого перебора алгоритмов в пределах обработки результатов одного испытания.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполнения диссертационных исследований были разработаны теоретические и прикладные подходы к обработке результатов НК, которые позволяют синтезировать вычислительные алгоритмы определения временного положения отраженных от поверхности горения зондирующих сигналов, направленные на максимальное снижение погрешности этого определения, а также создан программный комплекс визуализации и обработки результатов применения физических методов исследования твердотопливных ЭУ на основе вейвлетных технологий.

При этом решены следующие частные задачи:

1. Создан специализированный программный продукт обработки результатов контроля на основе вейвлетных технологий, обеспечивающий выделение и регистрацию временных координат заряда на фоне мощного широкополосного шума.

2. Создана методическая база обработки результатов НК энергетических установок из ПКМ на основе применения вейвлетных технологий при исследованиях с использованием ультразвукового и микроволнового методов толщинометрии (одномерный случай) и при обработке радиационных изображений (двумерный случай), в результате чего:

- созданы теоретические основы разработки алгоритмов построения новых базисных функций вейвлет-преобразования применительно к задачам УЗ и СВЧ толщинометрии, позволяющие снизить погрешность определения временного положения эхо-сигнала по сравнению с известными вейвлетами;

- разработан метод определения временного положения эхо-сигналов по максимуму энергетического вейвлет-спектра, с использованием в качестве базисных функций стандартного ультразвукового сигнала, импульса Берлаге, а также базисных вейвлетов Morlet и Mhat;

- впервые предложен критерий оценки эффективности данного метода, определяющий вероятность того, что погрешность определения временного положения сигнала не превысит половины длины периода колебания исследуемого сигнала;

- на основе модельного сравнения выявлены преимущества синтезированных базисов по сравнению с известными при определении временного положения сигнала с учетом неунимодальности распределения погрешности;

- установлено, что использование предложенного подхода определения времени прихода зондирующего сигнала, отраженного от поверхности горения, по максимуму энергетического вейвлет-спектра позволяет снизить погрешность определения координаты эхо-импульса в 2...3 по сравнению с известными вейвлетами;

- создан способ обработки радиационных изображений, основанный на согласовании структуры изображения и типа вейвлета и ограничении толщины выделяемого контура не более величины свода, сгорающего за секунду, что позволяет корректно применять процедуру многомасштабной обработки без внесения погрешностей в дальнейшие расчеты. Установлено

преимущество вейвлет-обработки при низких отношениях сигнал/шум, что характерно для большинства практических случаев.

3. Теоретически исследовано распространение УЗ сигнала через свод топливного элемента толщиной не менее 600 мм в одном направлении, как в частотно-зависимой среде, и установлены закономерностей изменения его амплитудных и спектральных характеристик, что позволяет обоснованно выбирать параметры электрического тракта системы.

4. Предложена методология проектирования адаптивной ультразвуковой системы, в которой формирование зондирующего сигнала в виде комбинации вейвлетообразных структур направлено на повышение точности определения временного положения сигнала.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монографии:

1. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.** Вейвлетные технологии обработки результатов контроля ЭУ. Монография. Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 137 с. – ISBN: 978-3-659-24875-7. – 15,9 п.л.

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий:

2. Ефимов В.Г. Ультразвуковая система динамических измерений для исследования твердотопливных энергетических установок / В.Г. Ефимов, **Ю.Н. Ложкова**, А.Г. Митин // Ползуновский вестник. – 2011. – № 3/1. – С. 184–187.

3. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.** Импульсный телевизионный датчик в составе многоракурсной системы радиационной визуализации // Russian journal of Earth Sciences. – 2012. – № 10. – С. 92–100.

4. **Ложкова Ю.Н.** Вейвлет-технология обработки результатов исследования энергетических установок // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 1. – С. 52–60.

Статьи в зарубежных изданиях:

5. Efimov, V.G. A method of quality comparison of different reference function application for ultrasonic measurement problems / V.G. Efimov, **J.N. Lozhkova** // Nondestructive Testing and Evaluation. – 2011. – V. 26, № 2. – P. 181–185.

Статьи в других научных изданиях:

6. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Попов В.И. Обоснование выбора вейвлетных базисов для задач ультразвуковой толщинометрии. Информационные технологии в науке, экономике и образовании»: материалы Всероссийской научной конференции 16-17 апреля 2009 года. В 2-х ч.; ч.1/ под.ред. О.Б.Кудряшовой; Алт.гос.техн.ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт.гос.техн. ун-та, 2009. – С. 117–118.

7. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Попов В.И. Некоторые показатели эффективности применения базисных вейвлетных функций. Инновационные технологии: производство, экономика, образование: материалы Всероссийской научно-практической конференции 24 сентября 2009 года / под. ред. Г.В.Леонова; Алт.гос.техн.ун-т, БТИ.– Бийск: Изд-во Алт.гос.техн. ун-та, 2009. – С. 243–244.

8. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Попов В.И. Имитационное сравнение вейвлетных базисов в задачах ультразвуковой эхо-локации твердотопливных энергетических установок. Сборник трудов Международной научной конференции “Становление и развитие научных исследований в высшей школе”, посвященной 100-летию со дня рождения профессора А.А. Воробьева: сборник трудов. Том 2. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – С. 56–58.

9. Efimov V.G., **Lozhkova J.N.** Wavelet analysis in ultrasonic determining of solid propellant burning rate. Proceedings of 11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2010. – P. 325–327.

10. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Фисько А.В. Вейвлет-анализ – новые возможности для неразрушающего контроля энергетических установок. Информационные технологии в науке, экономике и образовании»: материалы Всероссийской научной конференции 2-3 сентября 2010 года. – С. 65–67.

11. Ефимов В.Г. Адаптивная ультразвуковая система динамической толщинометрии. Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010) / В.Г. Ефимов, **Ю.Н. Ложкова**, А.Г. Митин // Материалы Седьмой всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 130–133.

12. **Ложкова Ю.Н.** Некоторые дополнения к процедуре синтеза вейвлетных базисов / Материалы Всероссийских научных и научно-технических конференций (Computer-Based Conferences). XXIV ВНТК «Методы и средства измерений физических величин» // Нижний Новгород: Нижегородский научный и информационно-методический центр «Диалог» (ННиМЦ «Диалог»), 2010.– С. 45.

13. Efimov V.G., **Lozhkova J.N.** A method of building the basis of wavelet transform for ultrasonic thickness measurement problems Proceedings of 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011. – P. 285–287.

14. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.** Сравнение расчетных и теоретических параметров непрерывного вейвлет-преобразования в ультразвуковой толщинометрии энергетических установок // Сборник научных трудов I Всероссийской научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле с международным участием SibTest, 2011. – С. 207–210.

15. Ефимов, В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Горбунов М.Н. Разработка алгоритма непрерывного вейвлет-преобразования для образцовых функций / Информационные технологии в науке, экономике и образовании»: материалы Всероссийской научной конференции 22-23 сентября 2011 года. Под.ред. О.Б.Кудряшовой; Алт.гос.техн.ун-т, БТИ.- Бийск: Изд-во Алт.гос.техн. ун-та, 2011. – С. 33–36.

16. Вейвлет-анализ радиационных изображений с низким отношением сигнал/шум / В.Г. Ефимов, **Ю.Н. Ложкова**, Р.А. Сергиенко, М.Н. Горбунов // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник» («South-Siberian Scientific Bulletin»). – 2012. – № 1. – С. 42–43.

17. Программный комплекс обработки результатов адаптивного ультразвукового контроля изделий / В.Г. Ефимов, **Ю.Н. Ложкова**, А.В. Фисько // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник» («South-Siberian Scientific Bulletin»). – 2012. – № 1. – С. 44–46.

18. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Учайкина Е.С., Кулешов В.К. Информационная модель прохождения ультразвука через частотно-зависимую среду // Вестник науки Сибири. – 2012. – №1. – С. 104–108. – <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/206/262>.

19. Efimov V.G., **Lozhkova J.N.**, Gorbunov M.N. The program complex wavelet processing of the results ultrasonic and microwave research of power plants / Proceedings of 13th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2012. – P. 90– 93.

20. Ефимов В.Г., **Ложкова Ю.Н.**, Горбунов М.Н. Выявление предвестников нерасчётной работы энергетических установок по результатам вейвлет-анализа данных (в порядке постановки проблемы) // Южно-Сибирский научный вестник («South-Siberian Scientific Bulletin»). – 2012. – № 2. – С. 39–40.

Подписано в печать 01.04.2013 г. Печать – ризография. Заказ № 2013 – 37

Объем 1,22 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИВЦ БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

