

Коновалова Вера Сергеевна

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛЬНОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ  
ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Специальность: 05.11.16 - Информационно-измерительные и управляющие  
системы (приборостроение)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедры информационно-измерительных систем и технологий.

**Научный руководитель**

доктор технических наук, профессор  
Алексеев Владимир Васильевич

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
Мазин Валерий Дмитриевич, Санкт-Петербургский государственный  
Политехнический университет  
кандидат технических наук, доцент  
Антонюк Петр Евгеньевич, Санкт-Петербургский государственный  
технологический университет растительных полимеров

**Ведущая организация:**

Научно-исследовательский институт электроизмерительных приборов  
ОАО «НИИ ЭЛЕКТРОМЕРА»

Защита диссертации состоится “25” июня 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета “ЛЭТИ” имени В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ ” 2012 г.

Учёный секретарь совета,  
к.т.н., доцент

Боронахин А.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Измерение характеристик одиночных локальных сигналов представляет большой интерес в современных информационно-измерительных и управляющих системах. Данный класс сигналов достаточно часто встречается при контроле и исследовании сложных физических процессов и систем.

Локальные сигналы (ЛС) возникают в физических процессах и указывают на характер протекания процесса, в производственных системах. В измерительных системах ЛС могут нести как положительную информацию о состоянии объекта или процесса, так и отрицательную, являясь локальной помехой (ЛП).

В первом случае необходимо зарегистрировать и измерить параметры ЛС, что является достаточно сложной измерительной задачей, решению которой в работе уделено существенное внимание. Ее актуальность обусловлена проблемами, возникающими в задачах локационного характера (радиолокация, гидроакустика, медико-биологическая акустическая диагностика, диагностика железнодорожного полотна, дефектоскопия и т.п.).

Природа возникновения ЛП и её источники различны: это может быть кратковременным повышением уровня шумов на входах приемника, сбоем в работе регистрирующей аппаратуры, отказом оборудования, кратковременным внешним воздействием на измерительный элемент, «залипанием» старшего разряда цифрового счетчика, атмосферными воздействиями при передаче радиосигналов, промышленными помехами и т.д. Возникающие в каналах передачи и обработки сигналов ЛП, даже при небольшой частоте их появления, вносят большие погрешности при дальнейшей оценке полезной составляющей сигнала. В этом случае ЛП может вызвать серьезные изменения протекания технологического процесса (вплоть до чрезвычайных ситуаций). Этим объясняется существенное внимание, уделенное в настоящей работе вопросам обнаружения и удаления ЛП.

**Целью** данной работы является исследование и разработка алгоритмического обеспечения применения дискретного вейвлет-преобразования (ДВП), направленного на выделение и измерение параметров ЛС в условиях промышленных помех в информационно-измерительных системах (выделение полезной составляющей сигнала из аддитивной смеси сигналов различного рода, помех и шумов в режиме реального времени).

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Исследованы особенности применения вейвлет-преобразований к обработке реальных сигналов.

2. Разработана методика измерения параметров ЛС, выделенного из аддитивной смеси сигналов различного рода.

3. Разработана методика измерения параметров полезного сигнала представленного на фоне помех различного рода, в том числе вредных ЛП.

4. Разработан алгоритм реализации ДВП в режиме реального времени, оценены возможности его применения в реальном времени.

5. Разработанная методика применена для выявления дефектов железнодорожного полотна, обнаружения стыков железнодорожного полотна в режиме реального времени.

6. Разработанная методика применена для обработки измерительных сигналов, характеризующих параметры технологического процесса в условиях промышленных помех.

**Объект исследований.** Информационно-измерительные и управляющие системы (ИИУС), работающие в условиях промышленных помех в реальном времени, и их алгоритмическое обеспечение.

**Предмет исследований.** Информационный измерительный сигнал, подверженный воздействию аддитивных промышленных помех различного рода, в том числе ЛС.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовался аппарат теории случайных процессов и их фильтрации, математического анализа и линейной алгебры, теории моделирования, методов вычислительной математики.

Достоверность и обоснованность научных положений подтверждается результатами математического моделирования и экспериментальных исследований.

**Научна новизна.** В процессе проведения работы получены новые научные результаты:

- Методика измерения параметров ЛС в заданных частотных областях с помощью ДВП.
- Алгоритм скользящего вейвлет-преобразования, обеспечивающего измерение ЛС с заданной точностью в режиме реального времени.
- Методика определения требований к динамическим характеристикам измерительного канала на основе полученных оценок объемов вычислений алгоритмов скользящего ДВП на этапе разложения и восстановления.

**Практическая значимость.** Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при разработке:

- методики измерения и классификации дефектов железнодорожного полотна (разделение дефектов на сколы рельсов и просадки), а также выявления местоположения стыков рельсов. Указанная методика используется ООО «ИНЕРТЕХ» и на предприятиях Октябрьской дирекции по ремонту пу-

ти «Путьрем» ОПМС-8, ПМС-28 при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

- методики выделения полезного сигнала из аддитивной смеси помех, при создании «Аппаратно-программного модуля контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов АПМКУ для ИН-50» в г. Сургуте, Россия (2008 г).

Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки бакалавров и магистров по направлению 200100 «Приборостроение».

#### **Положения, выносимые на защиту**

- Методика восстановления сигнала по отдельным аппроксимирующим и детализирующим коэффициентам с предыдущей обработкой пороговой функцией позволяет измерять параметры ЛС в заданных частотных областях.

- Алгоритм скользящего ДВП, заключающийся в реализации вейвлет-разложения и вейвлет-восстановления текущего значения входной величины в течение шага дискретизации, позволяет измерять параметры ЛС в режиме реального времени.

- Методика определения требований к динамическим характеристикам измерительного канала, базирующаяся на значениях выражений, полученных для оценки объемов вычислений алгоритмов скользящего ДВП, обеспечивает проведение вейвлет-анализа в режиме реального времени.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня: Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (Санкт-Петербург, 2010 и 2011 г), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2010 г), Международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, 2010 г), Международном конгрессе «Цели развития тысячелетия» инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов» научно-практической конференции «Наукоёмкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» (Санкт-Петербург, 2010 и 2011 г), Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2011 г), III Международной научно-практической конференции «Измерения в Современном Мире - 2011» (Санкт-Петербург, 2011 г).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 4 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, 1 в других изданиях, 13 публикаций в сборниках трудов конференций, 1 учебное пособие.

**Личный вклад автора.** Все результаты, представленные в работе, получены соискателем лично.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 106 наименований, 4 приложения. Основная часть диссертации изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 81 рисунок и 17 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты новизна и практическая значимость работы, приведены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ методов выделения полезной составляющей из аддитивной смеси сигнала с помехами. Рассмотрены методы цифровой фильтрации, в том числе, дискретное преобразование Фурье и ДВП. В настоящей работе рассматриваются только дискретные сигналы с постоянной частотой дискретизации. Показано, что применительно к поставленным задачам, ДВП выгодно отличается от других видов обработки сигналов и выбрано в качестве инструмента для дальнейших исследований.

Измеряемый сигнал можно представить в следующем виде:

$$x(\Delta t \cdot i) = s(\Delta t \cdot i) + \zeta(\Delta t \cdot i) + a_n(\Delta t \cdot i) + a(\Delta t \cdot i), \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации,  $i$  – номер шага дискретизации,  $s(\Delta t \cdot i)$  – медленно изменяющийся полезный сигнал,  $\zeta(\Delta t \cdot i)$  – случайная шумовая помеха,  $a_n(\Delta t \cdot i)$  – импульсная случайная помеха,  $a(\Delta t \cdot i)$  – локальный сигнал (ЛС).

ЛС появляются в аддитивной смеси сигналов случайным образом и не являются постоянными по длительности.

Каждая составляющая сигнала, представленного выражением (1), проявляется в своём частотном диапазоне и может быть выделена при помощи ДВП. Спектр сигнала ограничивается частотой Найквиста  $f_0$ . Измеряемый сигнал  $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots\}$  при помощи вейвлета  $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_v}\}$  раскладывается на аппроксимирующие  $\mathbf{L} = \{l_i\}$  и детализирующие  $\mathbf{H} = \{h_i\}$  коэффициенты (здесь  $n_v$  – длина базисной функции вейвлета).

Результат разложения на аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты может быть представлен в следующем виде:

$$V\{\mathbf{X}\} = \left\{ \begin{array}{cc} 0 & \mathbf{H}_1 \\ \dots & \dots \\ 0 & \mathbf{H}_{r-1} \\ \mathbf{L}_r & \mathbf{H}_r \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{L}_r$  – вектор аппроксимирующих коэффициентов  $r$ -го уровня;  $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_r$  – векторы детализирующих коэффициентов. Процедура восстановления выглядит следующим образом:

$$\mathbf{X}^* = V^{-1} \{V\{\mathbf{X}\}\} = V^{-1} \begin{Bmatrix} 0 & \mathbf{H}_1 \\ \dots & \dots \\ 0 & \mathbf{H}_{r-1} \\ \mathbf{L}_r & \mathbf{H}_r \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

Показано, что для анализируемого класса сигналов лучшим образом подходит ДВП Добеши, который обладает следующими преимуществами:

1. ДВП Добеши имеют математическое описание, что позволяет обоснованно выбрать форму базисной функции под анализируемый сигнал.
2. ДВП Добеши обладают возможностью точного восстановления сигнала после разложения его на любое количество уровней.
3. Как доказано И. Добеши, ортогональные вейвлеты Добеши – это единственное семейство базисных вейвлет-функций, которые имеют минимальный размер носителя при заданном числе нулевых моментов.
4. На основании анализа ЛС, встречающихся в технологических процессах и ИИУС, оптимальным ДВП является вейвлет Добеши, что объясняется их схожестью по форме.

**Во второй главе** разрабатывается методика измерения параметров ЛС в заданных частотных областях с помощью ДВП. Приведены результаты исследования точностных характеристик измерения параметров ЛС при помощи ДВП Добеши.

Произведены исследования точности измерения параметров ЛС (значения и местоположения максимума ЛС, длительности ЛС). Для сигнала вида (1) в зависимости от соотношения частот  $s(\Delta t \cdot i)$  и  $a(\Delta t \cdot i)$  производилось выделение ЛС и низкочастотной составляющей сигнала. Диапазоны частот, на которых проявляются исследуемые сигналы, представлены на рис. 1, где  $S_s$ ,  $S_a$ ,  $S_\zeta$  и  $S_{in}$  – диапазоны частот, на которых могут проявиться низкочастотный сигнал, ЛС(ЛП), шум и импульсная помеха, соответственно;  $(1 < n \leq m)$ ,  $f_0$  – частота Найквиста. Выявлена зависимость точности измерения параметров от соотношения  $m/n$ . Установлено, что для надежного разделения  $s(\Delta t \cdot i)$  и  $a(\Delta t \cdot i)$  при помощи ДВП, частота дискретизации выбирается, таким образом, чтобы  $n$  и  $m$  являлись натуральными числами, т.к. это позволяет разделить измеряемые сигналы при вейвлет-разложении.

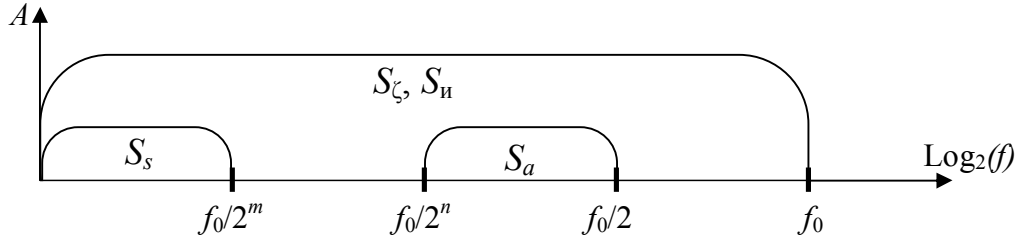


Рис. 1

Методика измерения параметров ЛС и низкочастотной составляющей может быть представлена в следующем виде:

1. Разложение сигнала осуществляется при помощи вейвлета Добеши по (2) на  $r$  уровней, где  $r = m + 1$ .

2. В исходный алгоритм восстановления (3) введены дополнительные множители  $\beta$ , которые определяют структуру восстанавливаемого (анализируемого) сигнала. Множители вводятся для определения коэффициентов восстановления, соответствующих частотной области измеряемого ЛС (удаление ненужных коэффициентов из алгоритма восстановления). Если для дальнейшей обработки не требуются некоторые коэффициенты разложения, то соответствующий множитель равен 0, если требуются – 1.

3. Детализирующие коэффициенты (соответствующие множителям  $\beta$  равным 1) подвергаются обработке пороговой функцией  $\alpha_k \{\mathbf{H}_k\}$ :

$$\alpha_k \{\mathbf{H}_k\} = \begin{cases} \text{если } h_{i_k}^k \geq \xi_k, & h_{i_k}^k = h_{i_k}^k \\ \text{если } h_{i_k}^k < \xi_k, & h_{i_k}^k = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $k$  - индекс коэффициента ( $k = 1, \dots, r$ ),  $\xi_k$  - является значением порога,  $h_{i_k}^k$  – элемент  $k$ -го детализирующего коэффициента. Пороговая функция вводится для удаления шумовой составляющей. Показано, что удобно вычислять значение порога через среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) результатов обрабатываемого детализирующего коэффициента. Например, в случае при котором шумовая составляющая имеет равномерный закон распространения, она будет удалена с вероятностью 99% при  $\xi_k = 3\sigma$ .

4. Восстановление исследуемого сигнала. Последовательность обработки исследуемого сигнала представлена следующим образом:

$$\mathbf{X}^* = V^{-1} \{V\{\mathbf{X}\}\} = V^{-1} \begin{Bmatrix} 0 & \alpha_1 \{\mathbf{H}_1 \beta_1\} \\ 0 & \alpha_2 \{\mathbf{H}_2 \beta_2\} \\ \dots & \dots \\ \mathbf{L}_r \beta_{r+1} & \alpha_r \{\mathbf{H}_r \beta_r\} \end{Bmatrix}. \quad (5)$$

5. Измерение максимума ЛС, его местоположения и длительности.



Оценена точность измерения параметров ЛС и низкочастотного полезного сигнала в случае их аддитивной смеси со случайными шумовой и импульсной помехами. При худшем соотношении частот ( $m=n$ ), даже при соотношении сигнал/шум равном 0,5, т.е. когда уровень шумов превосходит измеряемый сигнал в 2 раза. Пример моделирования представлен на рис.2.

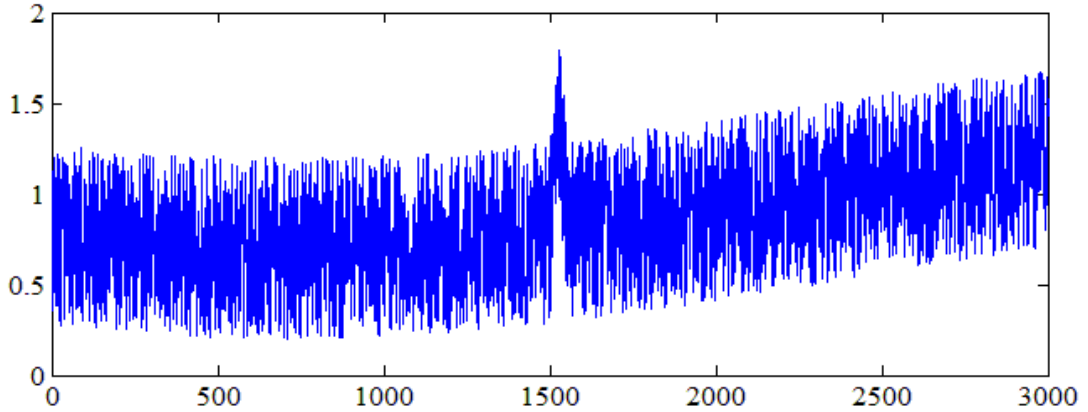


Рис. 2

Выделение ЛС производится по детализирующим коэффициентам от  $q$  до  $n$  уровня, где частоты ЛС лежат в диапазоне от  $f_0/2^n$  до  $f_0/2^q$  ( $n$  и  $q$  натуральные числа). Множители  $\beta$  для этих детализирующих коэффициентов равны 1. Пороговые функции описываются выражением (4), в котором пороговые значения выбираются по законам распределения соответствующего коэффициента с вероятностью удаления шумовой составляющей 95%. Измерение параметров ЛС (рис. 3) достигается с погрешностью: амплитуды максимального значения – до 20 %, длительности ЛС –  $\pm \Delta t$  (шаг дискретизации) с вероятностью 93%, позиционирования максимума –  $\pm \Delta t$  с вероятностью 88%. Полезный низкочастотный сигнал выделяется по аппроксимирующим коэффициентам  $n$ -го уровня, относительная погрешность не превосходит 3%.

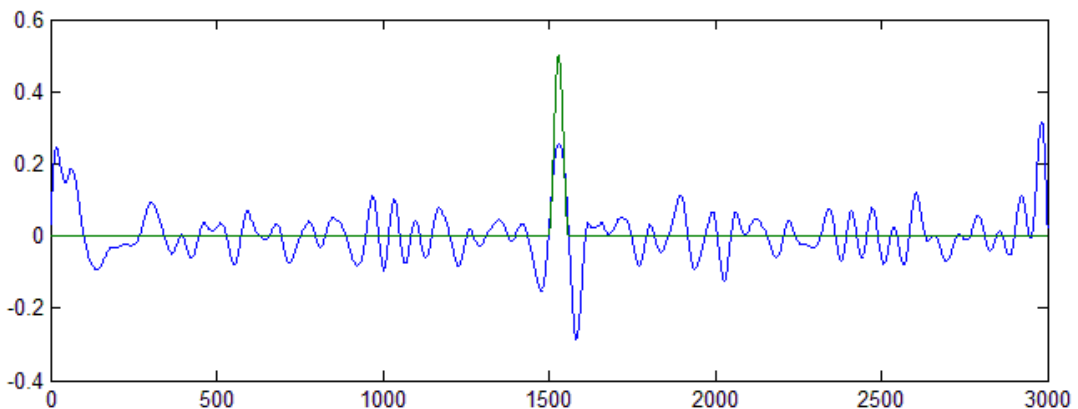


Рис.3

Вейвлет-преобразование порождает искусственные “скачки” на краях выборки, находящие отражения в коэффициентах разложения. Это явление является краевым эффектом, возникающим в следствие ограниченности анализируемой выборки (рис. 3). Длительность краевого эффекта, зависит от

длительности базисной функции вейвлета  $n_v$  и уровня разложения  $r$ , определяется по формуле  $Q = 2^r n_v$ . В работе показано, что для исключения влияния краевого эффекта при выборках ограниченной длительности, величина выборки должна превышать  $Q = 2^{r+1} n_v + 1$ .

**В третьей главе** разрабатывается скользящий алгоритм ДВП для реализации в режиме реального времени, получена оценка объемов вычислений и представлены блок-схемы программы для вейвлет-разложения и восстановления. Алгоритм имеет следующие этапы:

Начальный участок. Для исключения влияния краевого эффекта на результаты анализа производится набор массива измерений, необходимый для первого шага анализа по всем уровням. Показано, что длительность «Начального участка»  $Q_{n_v, r}$  определяется размером вейвлета  $n_v$  и необходимым уровнем разложения  $r$

$$Q_{n_v, r} = \begin{cases} 1 + (n_v - 1) \sum_{i=0}^{r-2} 2^i, & \text{если } r > 1 \\ n_v, & \text{если } r = 1 \end{cases} = \begin{cases} n_v + (n_v - 1) \sum_{i=1}^{r-2} 2^i, & \text{если } r > 1 \\ n_v, & \text{если } r = 1 \end{cases}. \quad (6)$$

Данное количество измерений является необходимым (минимальным) для получения первого значения аппроксимирующего  $\mathbf{L}_r$  и детализирующего  $\mathbf{H}_r$  коэффициентов на уровне  $r$ .

Первый уровень разложения:

1. Для каждого второго отсчета выборки  $\mathbf{X} = \{x_i\}$  формируется вектор длительностью  $n_v - \mathbf{X}_i = \{x_{i-n_v+1}, x_{i-n_v+2}, \dots, x_i\}$ .

2. Осуществляется свертка вектора  $\mathbf{X}_i$  с базисными функциями – вычисление одного отсчета 1-го уровня разложения

$$l_{i_1}^1 = \mathbf{X}_i \times \Phi^T \quad h_{i_1}^1 = \mathbf{X}_i \times \Psi^T, \quad (7)$$

где  $i_1 = (i - n_v)/2$ ;  $\Phi^T$  и  $\Psi^T$  – векторы базисных функции разложения.

Полученный результат  $l_{i_1}^1$  является элементом вектора аппроксимирующих коэффициентов разложения 1-го уровня  $\mathbf{L}_1 = \{l_1^1, l_2^1, \dots, l_{i_1}^1\}$ , а  $h_{i_1}^1$  – элементом вектора детализирующих коэффициентов разложения 1-го уровня  $\mathbf{H}_1 = \{h_1^1, h_2^1, \dots, h_{i_1}^1\}$ .

$k$ -ый уровень разложения:

1. Для каждого второго отсчета выборки  $\mathbf{L}_{(k-1)} = \{l_{i(k-1)}^{(k-1)}\}$  формируется вектор длительностью  $n_v - \mathbf{L}_{i(k-1)}^{(k-1)} = \{l_{i(k-1)-n_v+1}^{(k-1)}, l_{i(k-1)-n_v+2}^{(k-1)}, \dots, l_{i(k-1)}^{(k-1)}\}$ .

2. Осуществляется свертка вектора  $\mathbf{L}_{i(k-1)}^{(k-1)}$  с базисными функциями – вычисление одного отсчета 1-го уровня разложения

$$l_{i_k}^k = \mathbf{L}_{i(k-1)}^{(k-1)} \times \Phi^T \quad h_{i_k}^k = \mathbf{L}_{i(k-1)}^{(k-1)} \times \Psi^T, \quad (8)$$

где  $i_k = (i_{(k-1)} - n_v)/2$ . Полученный результат  $l_{i_k}^k$  является элементом вектора аппроксимирующих коэффициентов разложения  $k$ -го уровня  $\mathbf{L}_k = \{l_1^k, l_2^k, \dots, l_{i_k}^k\}$ , а  $h_{i_k}^k$  – элементом вектора детализирующих коэффициентов разложения  $k$ -го уровня  $\mathbf{H}_k = \{h_1^k, h_2^k, \dots, h_{i_k}^k\}$ .

Алгоритм разложения представлен на рис. 4.

Полученные значения детализирующих коэффициентов  $k$ -го уровня обрабатываются пороговой функцией –  $\alpha_k\{\cdot\}$ , после чего поступают на восстановление

$$\alpha_k\{\mathbf{H}_k\} = \begin{cases} \text{если } h_{i_k}^k \geq \xi_k, & h_{i_k}^k = h_{i_k}^k \\ \text{если } h_{i_k}^k < \xi_k, & h_{i_k}^k = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

Коэффициенты, не затребованные в дальнейших расчетах, обнуляются множителем  $\beta$  или не вычисляются вовсе.

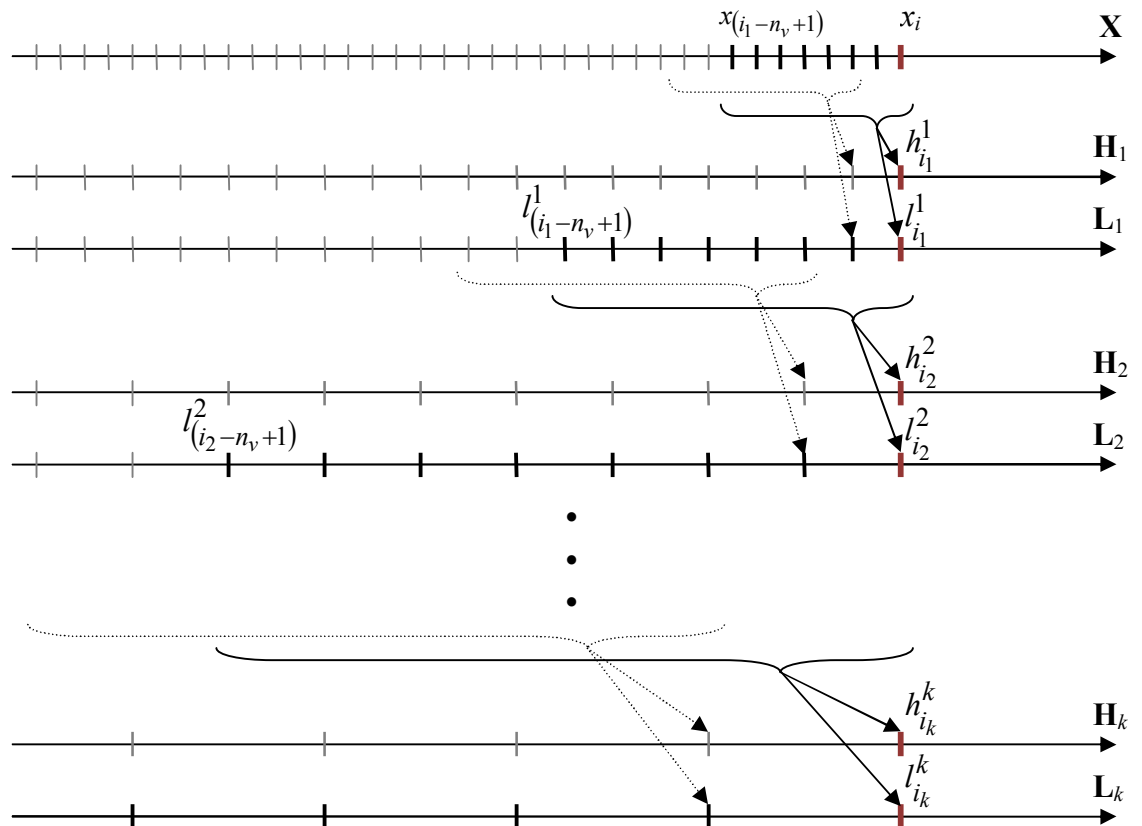


Рис. 4

$k$ -ый уровень восстановления (аналогичен разложению):

1. Из рассчитанных аппроксимирующих и обработанных пороговой функцией детализирующих коэффициентов уровня набираются выборки длительностью  $n_v/2$

$$\mathbf{L}_{i_k}^{*k} = \left\{ l_{i_k - \frac{n_v}{2} + 1}^{*k}, l_{i_k - \frac{n_v}{2} + 2}^{*k}, \dots, l_{i_k}^{*k} \right\} \quad \mathbf{H}_{i_k}^{*k} = \left\{ h_{i_k - \frac{n_v}{2} + 1}^{*k}, h_{i_k - \frac{n_v}{2} + 2}^{*k}, \dots, h_{i_k}^{*k} \right\}.$$

2. Выборки дополняются нулями до объёма  $n_v$

$$\mathbf{L}_{i_k 0}^k = \left\{ 0, l_{i_k - \frac{n_v}{2} + 1}^k, 0, l_{i_k - \frac{n_v}{2} + 2}^k, 0, \dots, 0, l_{i_k}^k \right\}, \quad \mathbf{L}_{0i_k}^k = \left\{ l_{i_k - \frac{n_v}{2} + 1}^k, 0, l_{i_k - \frac{n_v}{2} + 2}^k, 0, \dots, 0, l_{i_k}^k, 0 \right\},$$

$$\mathbf{H}_{i_k 0}^k = \left\{ 0, h_{i_k - \frac{n_v}{2} + 1}^k, 0, h_{i_k - \frac{n_v}{2} + 2}^k, 0, \dots, 0, h_{i_k}^k \right\}, \quad \mathbf{H}_{0i_k}^k = \left\{ h_{i_k - \frac{n_v}{2} + 1}^k, 0, h_{i_k - \frac{n_v}{2} + 2}^k, 0, \dots, 0, h_{i_k}^k, 0 \right\}.$$

3. Производится свертка с обратными базисными функциями  $(\varphi^{-1})^\Gamma$  и  $(\Psi^{-1})^\Gamma$  – вычисляются два аппроксимирующих коэффициента предыдущего уровня

$$l_{i_{(k-1)}}^{*(k-1)} = \mathbf{L}_{0i_k}^{*k} \times (\varphi^{-1})^\Gamma + \mathbf{H}_{0i_k}^k \times (\Psi^{-1})^\Gamma \quad l_{(i_{(k-1)})+1}^{*(k-1)} = \mathbf{L}_{i_k 0}^{*k} \times (\varphi^{-1})^\Gamma + \mathbf{H}_{i_k 0}^k \times (\Psi^{-1})^\Gamma \quad (10)$$

Максимальное значение операций для вычисления всех аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов до  $r$ -го уровня разложения, которые находятся в интервале между двумя отсчетами измерительного сигнала (для удобства оценки под одной операцией подразумевается одна операция сложения и одна операция умножения):

$$O_{rp} = 2n_v r. \quad (11)$$

При восстановлении сигнала:

$$O_{rv} = 4n_v \sum_{i=1}^r 2^i. \quad (12)$$

Разработанный алгоритм реализуется с помощью измерительного канала, динамические характеристики которого определяются следующим образом:

1. На основании методики измерения параметров ЛС определяется число уровней разложения  $r$  и длина базисной функции вейвлета  $n_v$ .

2. Определяются объёмы вычислений, необходимые для реализации скользящего ДВП в соответствии с выражениями (11) и (12).

3. Формируются требования к быстродействию процессора в измерительном канале с учетом полученных результатов и необходимых затрат на осуществление операций передачи данных и управление.

В четвертой главе приведен алгоритм анализа параметров ЛС применительно к сигналу, характеризующему состояние железнодорожного полотна.

Данные, поступающие от микромеханического акселерометра, расположенного на буксе колесной пары железнодорожного вагона, могут охарактеризовать дефекты двух видов – сколы и просадки. Кроме того, по указанным данным при помощи одометра можно определить местоположение стыков рельсов.

На основе методик, описанных в третьей главе, реализован алгоритм, обеспечивающий обнаружение и измерение ЛС в реальном времени. На рис. 5 представлены сигналы, полученные при восстановлении по каждому из коэффициентов без пороговых значений.

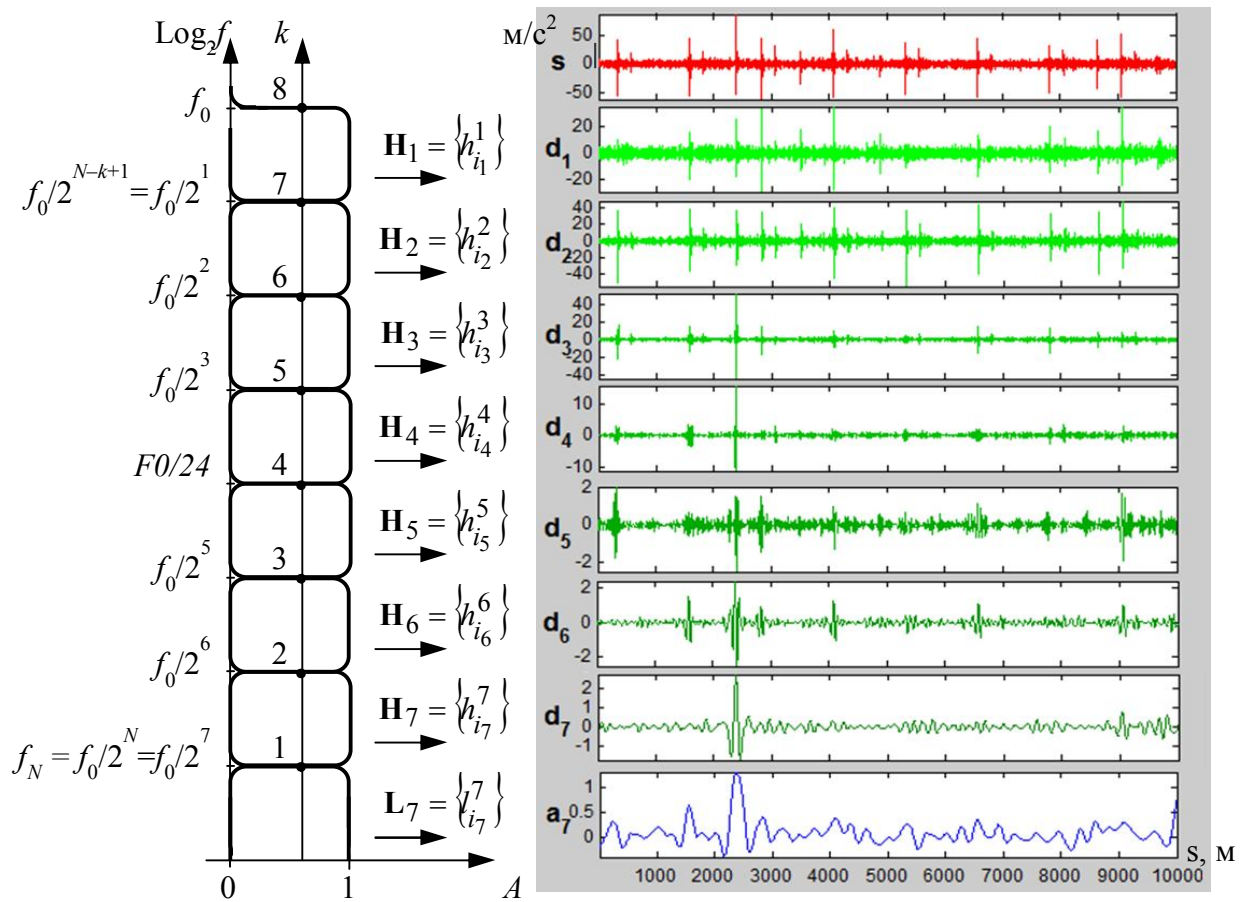


Рис. 5

ЛС, соответствующие стыкам рельсов, определяются в частотном диапазоне 2 и 3го уровня анализа ДВП. По произведенному анализу, шум, сопровождающий измерения, характеризуется гауссовым законом распределения. При пороговых значениях равных  $2\sigma$  удаётся выделить полезную составляющую с вероятностью 95%. Для восстановления используется выражение (5) с множителями  $\beta_2 = \beta_3 = 1$ , остальные равны множители  $\beta$  равны 0. Пороговые значения  $\xi_2 = 2\sigma_2$ ,  $\xi_3 = 2\sigma_3$ . Результаты ускорений от стыков  $A_{ст}$  представлены на рис. 6.

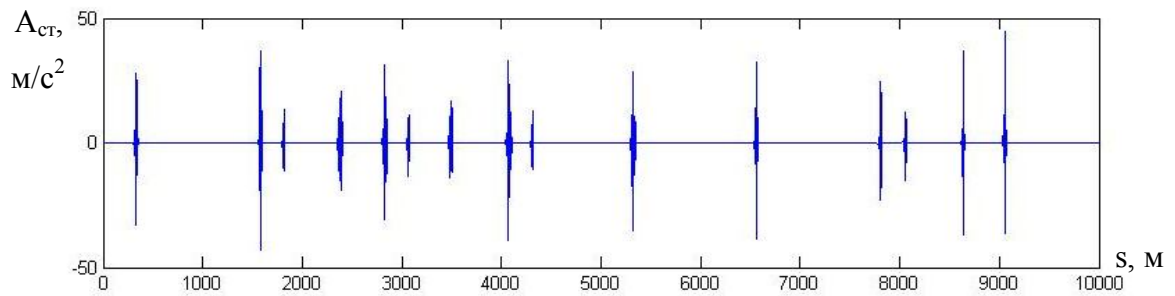


Рис. 6

ЛС, соответствующие сколам рельсов определяются в частотном диапазоне 5-го и 6-го уровня анализа ДВП ( $\beta_5 = \beta_6 = 1$ ). При восстановлении по детализирующим коэффициентам с пороговым значением  $\xi_5 = 2\sigma_5$ ,  $\xi_6 = 2\sigma_6$ , шумовая составляющая отбрасывается с вероятностью 95%. Результаты ускорений от сколов  $A_{ск}$  представлены рис. 7.

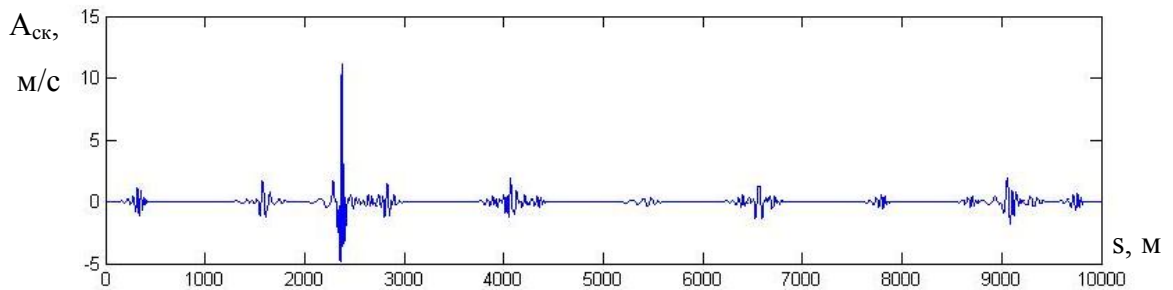


Рис. 7

Восстановленные значения вертикального ускорения преобразуются в вертикальное перемещение путем операции двойного интегрирования, после чего возможно измерение значений сколов с точностью до 0,1 мм.

Просадки определяются по аппроксимирующим коэффициентам без порогового значения в соответствии с выражением (5), при чем  $\beta_8 = 1$  и  $r = 7$  (рис. 8).

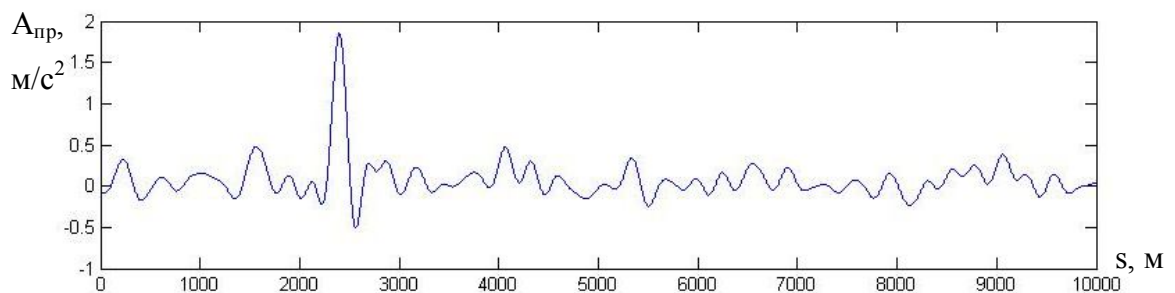


Рис. 8

Разработанная методика внедрена в виде алгоритма выделения полезной составляющей измеряемого сигнала в каналах ИИС мониторинга состояния и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов АПМКУ для ИН-50. Восстановление измеряемого сигнала (подавление ЛП) осуществляется с точностью 3%. Например, для измерения температуры в печи, производится разложение по алгоритму скользящего ДВП. Разложение осуществляется на 6 уровней, а восстановление – только по аппроксими-

рующим коэффициентам (см. рис .9). Данное соотношение сохраняет все локальные особенности сигнала, удаляет шумовые, импульсные и локальные помехи.

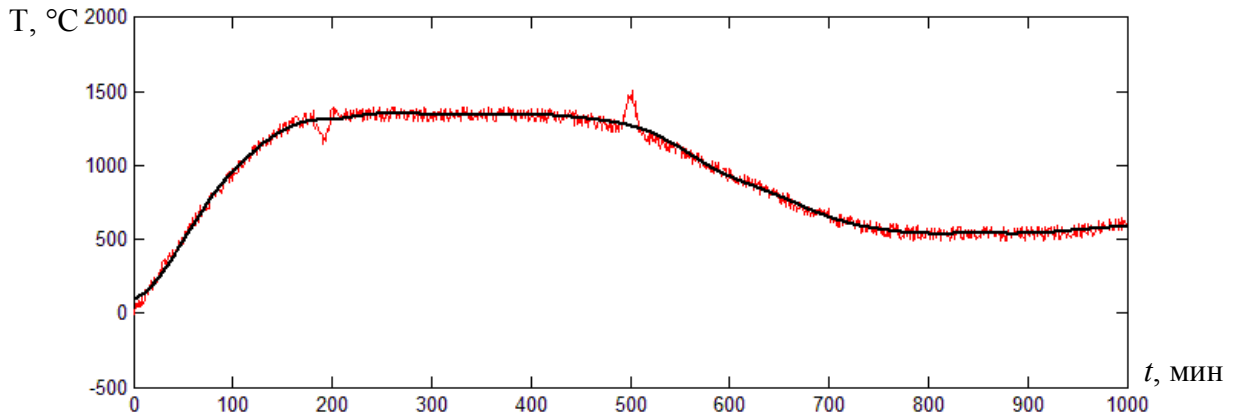


Рис. 9

На рисунке искажение сигнала в начале измерений определяется набором «Начального участка». Длительность искажения не превосходит оценочные данные.

**В приложение** вынесены таблицы с результатами измерений и акты о внедрении.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Методика восстановления сигнала по отдельным аппроксимирующим и детализирующим коэффициентам с предыдущей обработкой пороговой функцией позволяет измерять параметры ЛС в заданных частотных областях.
- Алгоритм скользящего ДВП, заключающийся в реализации вейвлет-разложения и вейвлет-восстановления текущего значения входной величины в течении шага дискретизации, позволяет измерять параметры ЛС в режиме реального времени.
- Методика определения требований к динамическим характеристикам измерительного канала, базирующаяся на значениях выражений, полученных для оценки объемов вычислений алгоритмов скользящего ДВП, обеспечивает проведение вейвлет-анализа в режиме реального времени.
- Применение разработанных методики и алгоритма для измерения и классификации дефектов железнодорожного полотна (разделение дефектов на сколы рельсов и просадки), для повышения точности привязки к реальным координатам, производится выявление «маски» железнодорожного пути – местоположение стыков рельсов.
- Применение разработанных методики и алгоритма для выделения полезного сигнала, характеризующего параметр ТП, на фоне помех, шумов и ЛС.

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ*****В рецензируемом журнале из списка ВАК***

1. Алексеев В.В., Чарнецкий А.Д., Королев П.Г., Комшилова К.О., Коновалова В.С., Марченков Р.Ю. ИИС контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов (часть 1) // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ", вып. 3, 2011, с. 72 – 78.
2. Алексеев В.В., Чарнецкий А.Д., Королев П.Г., Комшилова К.О., Коновалова В.С., Марченков Р.Ю. ИИС контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов (часть 2) // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ", вып. 4, 2011, с.65 – 73.
3. Алексеев В.В., Боронахин А.М., Калякин И.В., Коновалова В.С., Подгорная Л.Н. Измерение характеристик железнодорожного полотна с помощью измерительной системы, построенной на базе микро механических акселерометров // Приборы, вып. №12 (138), 2011, с. 22 – 29.
4. Алексеев В.В., Королев П.Г., Коновалова В.С., Марченков М.Ю. Информационно-измерительная система контроля и управления технологическим процессом // Приборы, вып. №10 (112), 2009, с. 43 – 48.

***В других изданиях***

5. Дубко А.В., Дудина Е.В., Коновалова В.С., Королев П.Г. Анализ подходов к разработке программного обеспечения измерительно-вычислительных систем мониторинга технологических процессов. // Труды конф. "Проблемы прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий". - СПб., 28 ноября 2007.-С. 85-88.
6. Алексеев В.В., Королев П.Г., Комшилова К.О., Коновалова В.С. ИИС контроля управления технологическим процессом термического уничтожения отходов. // Материалы научно-практической конференции "Цели развития тысячелетия" инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России" Научно-технологические и инновационные технологии в решении прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий. – СПб.15 ноября 2008. – с. 44-48.
7. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Королев П.Г. Модели приборов для виртуальной лабораторной работы "Исследование метрологических характеристик средств измерения частоты и периода" // Сборник трудов VII научно-практической конференции: Образовательные, научные и инженерные приложения в среде LabVIEW и технологии National Instruments. – Москва 28-29 ноября 2008. – с. 531-536.
8. Коновалова В.С. Автоматизированная система мониторинга параметров технологического процесса. // Сб. докладов 62-ой научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 27 января – 8 февраля 2009, с. 190–195.



9. Алексеев В.В., Коновалова В.С. Обеспечение заданной надежности предупреждения аварийных ситуации при измерении уровня веществ опасных ТП // Материалы международного конгресса «Цели развития тысячелетия» инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России» научно-практической конференции «Транспортно-коммуникационная система Арктики в геополитическом взаимодействии и управлении регионами в условиях чрезвычайных ситуаций» - СПб, 13-14 ноября 2009. – с.58-62.
10. Алексеев В.В., Чарнецкий А.Д., Королев П.Г., Комшилова К.О., Коновалова В.С., Марченков Р.Ю. ИИС Контроля и управления технологическим процессом термического уничтожения отходов // Метрологическая академия Вестник Северо-Западного Отделения. Кафедре ИИСТ 80 лет!, СПб, 2009.
11. Алексеев В.В., Коновалова В.С. Измерительный комплекс для обработки, передачи и отображения информации в условиях повышенных промышленных помех // Сборник докладов XIII международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, 23-25 июня 2010г, СПб. Изд-во: СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – с. 43-45.
12. Алексеев В.В., Коновалова В.С. Система измерения технологических параметров в условиях повышенных промышленных помех. Россия, Санкт-Петербург. // Труды Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». - Новосибирск, 22-24 сентября 2010. – Т.3. – с. 38-40.
13. Алексеев В.В., Коновалова В.С. Применение вейвлет преобразования в измерительном канале. Труды международной научно-технической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» «Шляндинские чтения 2010», 20–22 октября, Пенза. – с.18-22.
14. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Алгоритм подавления аномальных помех в измерительном сигнале. // Материалы III Международного конгресса «Цели развития тысячелетия» инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов» научно-практической конференции «Научоёмкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» - СПб, 12-13 ноября 2010. – с.129-133.
15. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Идентификация параметров аномального сигнала с помощью Вейвлет–преобразования // Труды международной научно -технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» 19 – 22 апреля 2011 г. Пенза.
16. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Применение вейвлет преобразования для подавления аномальных помех в измерительном канале // Труды третьей международной научно-практической конференции «Измерения в современном мире- 2011», 17 - 20 мая 2011 г. СПб.

17. Алексеев В.В., Коновалова В.С., Калякин И.В. Алгоритм скользящего вейвлет–преобразования для обработки сигнала в реальном времени // Сборник докладов XIV международной конференции по мягким вычислениям и измерениям, 23-25 июня 2011г, СПб. Изд-во: СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

18. Алексеев В.В., Коновалова В.С. Калякин И.В. Алгоритм измерения параметров аномального сигнала с использованием скользящего вейвлет преобразования // Материалы международного конгресса «Цели развития тысячелетия» инновационные принципы устойчивого развития арктических регионов России» научно-практической конференции «Наукоемкие и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий» - СПб, 2011. – 66-73 с.

***Учебные пособия***

19. Измерительно-вычислительные системы на базе ПЛК (применение в технологических процессах). Алексеев В.В., Иващенко О.А., Коновалова В.С., Комшилова К.О., Королев П.Г. // Учебное пособие, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 64 с.