

На правах рукописи



ПОНОМАРЕВА Ольга Владимировна

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ
ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ
В ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ БАЗИСАХ ФУРЬЕ**

Специальность: 05.13.01

**Системный анализ, управление и обработка информации
(в науке и технике)**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Ижевск – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Научный консультант **Алексеев Владимир Александрович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Официальные оппоненты член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор,
Кондратьев Вячеслав Васильевич,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», заведующий кафедрой вычислительных систем и технологий;

доктор технических наук, профессор,
Батищев Виталий Иванович,
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», заведующий кафедрой информационных технологий;

доктор технических наук, профессор,
Ильин Герман Иванович,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева», заведующий кафедрой радиоэлектронных и квантовых устройств

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва»

Защита состоится «16» марта 2017 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.065.06 в Ижевском государственном техническом университете имени М.Т. Калашникова по адресу 426033, г. Ижевск, ул. 30 лет Победы, 2, 5 корпус ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

С диссертацией и авторефератом диссертации можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», <http://istu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 426069, г. Ижевск, Студенческая, д. 7, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Вологдин Сергей Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Решение важной и актуальной проблемы повышения эффективности и качества современных технических систем различного назначения, достижения надежности их функционирования, невозможно без получения и обработки потоков информации об исследуемых объектах, явлениях и процессах, включая вопросы анализа, моделирования, оптимизации, совершенствования управления и принятия решения на основе теоретических и прикладных исследований информационных сигналов (ИС) как системы (средства) упорядоченного отображения и передачи информации об изменениях свойств, состояний, физических величин, характеризующих объекты исследования.

В успешном решении указанной проблемы и соответствующих ей задач ключевую роль играют методы, алгоритмы и средства цифровой обработки сигналов¹ (ЦОС) (Digital Signal Processing – DSP).

Это объясняется с одной стороны преимуществами цифровой обработки информационных сигналов (ЦОИС) перед аналоговыми методами обработки информационных сигналов, с другой стороны это связано с тем, что параметры сложных², случайных и смешанных³ ИС, порождаемых (формируемых) исследуемыми объектами являются, как правило, основными физическими носителями информации об их характеристиках, свойствах и состояниях.

Теоретические и прикладные исследования, проведенные к середине 60-х годов прошлого столетия как у нас в стране, так и за рубежом, выявили преимущества классических методов цифровой спектральной обработки ИС, которые основаны на дискретном преобразовании Фурье (ДПФ), его аналитических и статистических свойствах, а также свойствах его дискретного экспоненциального базиса.

Однако, вплоть до 1965 года, практические результаты ЦОИС были получены только для низкочастотных сейсмических сигналов⁴ из-за больших вычислительных затрат при реализации ДПФ. Появление метода быстрого вычисления ДПФ (Cooley J.W., Tukey J.W. 1965 г.), сократившего время

¹ **Сигнал (информационный сигнал)**– это материальный носитель информации различной физической природы о процессах, явлениях, состояниях или физических величинах объектов материального мира, средство перенесения информации в пространстве и времени. **Обработка информационных сигналов** – извлечение содержащейся в сигналах информации о состояниях, системных связях и закономерностях функционирования исследуемых объектов, процессов и явлений. **Информация** содержащаяся в сигналах обычно представляется изменением одного или нескольких их параметров называемых **информационными параметрами**.

² **Сложный информационный сигнал** – информационный сигнал, который может быть представлен в виде суммы простых колебаний (гармоник).

³ **Смешанный информационный сигнал** – информационный сигнал, который может быть представлен в виде суммы сложного информационного сигнала и случайного информационного сигнала (шума).

⁴ **Л. Рабинер, Б. Гоулд.** Развитие и применение цифровой обработки сигналов.–М: Мир,.1978.– 839 с.: ил.

вычислений ДПФ на несколько порядков и получившего название алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), резко изменило положение дел. Создание алгоритма БПФ дало мощный толчок развитию цифровых информационных технологий, внедрению ЦОИС во многие области науки и техники.

Значительный вклад в развитии теории и практики ЦОИС внесли работы как зарубежных ученых: Винера Н., Габора Д., Добеши И., Кайзера Д., Голда Б., Кули Д., Тьюки Д., Рэйдера Ч., Рабинера Л., Оппенгейма А., Шафера Р., Марпланд С., Дженкинса Г., Ваттса Д. и др., так и отечественных ученых: Мандельштама Л. И., Котельникова В. А., Харкевича А. А., Хинчина А. Я., Рытова С. М., Цыпкина Я. З., Гуляева Ю. В., Виленкина Н. Я., Кондратьева В. В., Витязева В. В., Зубарева Ю. Б., Пойды В. Н., Трахтмана А. М., Трахтмана В. А. и др.

В ЦОИС можно выделить следующие основные направления научных и прикладных исследований: **классические методы цифровой спектральной обработки ИС** (спектральный⁵ и векторный анализ⁶, линейная и гомоморфная фильтрация, корреляционный анализ, скользящий Фурье-анализ, двойной по частоте спектр), **неклассические методы цифровой спектральной обработки ИС** (методы, основанные на авторегрессионных моделях ИС, методы: Прони, минимальной дисперсии, собственных чисел), **дискретный вейвлетный анализ**⁷.

Анализ приложений методов ЦОИС, разработанных в различных предметных областях в рамках указанных направлений позволяет сделать следующие выводы.

1. Классические методы цифровой спектральной обработки ИС: сохраняют свою ведущую роль и эффективность своих приложений практически во всех предметных областях. Они применимы почти ко всем классам стационарных и смешанных ИС. Спектральные оценки, полученные классическими методами, являются робастными (наиболее структурно устойчивыми) оценками спектров стационарных ИС. и наиболее эффективными с вычислительной точки зрения за счет применения БПФ. В тоже время практика применения методов и алгоритмов ЦОИС, основанных в той или иной мере на ДПФ, выявила и их недостатки, существенно снижающие результативность решения задач обработки ИС классическими методами. Недостатки классических методов цифровой спектральной обработки ИС вытекают непосредственно из свойств ДПФ и проявляются в виде известных эффектов (**эффектов наложения, частотола, утечки, гребешкового эффекта**).

⁵ **Дискретный спектральный анализ** – группа методов дискретной Фурье – обработки дискретных сигналов, которая не включает определение фаз синусоидальных составляющих информационных сигналов.

⁶ **Дискретный векторный анализ** – группа методов дискретной Фурье – обработки дискретных сигналов, при которой требуется получение полной информации о частотах, амплитудах и фазах синусоидальных составляющих исследуемых сложных информационных сигналов и/или их изменений во времени.

⁷ **Дискретный вейвлетный анализ** – группа дискретных вейвлет-преобразований (DWT), в рамках которых анализируемые сигналы рассматривают в терминах временных колебаний (вейвлетов), локализованных по времени и частоте.

2. Наблюдается расширение спектра применения неклассических методов цифровой спектральной обработки стационарных случайных и смешанных ИС, основанных на авторегрессионных и иных моделях ИС. В этих методах обработки, в отличие от классических методов цифровой спектральной обработки, выбирается некоторая модель ИС (модель авторегрессионного (АР) процесса, модель процесса скользящего среднего (СС) или модель авторегрессии – скользящего среднего (АРСС)) или иная модель, описываемая некоторым набором параметров, значения которых определяются в процессе обработки. Анализ этих методов и алгоритмов обработки, показал, что их существенными недостатками являются **ограниченность области приложений и субъективность**⁸.
3. Теория вейвлетного анализа дает сложный, но достаточно эффективный инструмент для решения некоторых практических задач, при этом **большую роль играет интуиция и опыт исследователя**. В отличие от традиционных направлений обработки ИС, данная теория не является фундаментальной физической теорией⁹. Вейвлетный анализ, (мультиразрешающий анализ¹⁰), значительно расширивший аппарат **информационных технологий обработки нестационарных ИС**, не является универсальным методом решения задач обработки и анализа ИС. Тем более вейвлетный анализ не следует рассматривать как замену классическим методам спектральной обработки и анализа информации, хотя бы в силу того, что полигармонические и стационарные дискретные ИС широко распространены, как в природе, так и в технических системах, а результаты, полученные в рамках традиционных направлений обработки информации **значительны и главное проверены временем**.
4. Существующие попытки оценивания **абсолютного превосходства** тех или иных методов цифровой обработки ИС над другими методами являются **изначально контрпродуктивными**, т.к. каждый метод, алгоритм цифровой обработки ИС имеет то или иное, но свое, наиболее эффективное приложение.
5. С целью повышения результативности методов и алгоритмов цифровой обработки ИС в той или иной предметной области проводится ориентация на максимальный учет специфики ИС в конкретной области исследований в ущерб универсальности подходов.

Несмотря на то, что классические методы цифровой спектральной обработки ИС сохраняют, как показал проведенный анализ, свою ведущую роль в обработке ИС, результаты могли быть более значимыми, если бы не их принципиальные недостатки, которые вытекают **как из природы ДПФ, так и из**

⁸ Яглом А.М. Корреляционная теория стационарных случайных функций с примерами из метеорологии. -Л.:1981.-281 с.

⁹ prodav.exponenta.ru

¹⁰ Mallat S.G. Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$. Trans. Amer.Soc. 315 (1989), 69-87.

аналитических и стохастических свойств его базиса – базиса дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ).

Отметим, что неклассические методы спектральной обработки ИС в целом создавались, как альтернатива классическим методам спектральной обработки ИС с целью преодоления недостатков последних. Однако, как показала практика применения разработанных неклассических методов спектральной обработки ИС, существующая проблема была решена лишь отчасти, так как методы данного класса требуют больших допущений, чем классические, а получаемые спектральные оценки ***структурно устойчивы (робастны) только для ограниченного класса стационарных ИС.***

Применение ***вейвлетного анализа*** для цифровой обработки стационарных и смешанных ИС также не является эффективным инструментом, так как смысл вейвлетного анализа заключается скорее в изучении нерегулярностей, чем в их исключении¹¹.

Из проведенного системного анализа приложений методов цифровой обработки ИС, непосредственно следует вывод о важности и актуальности проведения научных и прикладных исследований в следующих направлениях:

- развитие и совершенствования теоретических основ классических методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки ИС во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях;
- разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки ИС;
- поиск наиболее адекватных базисных систем, обеспечивающих оптимальное решение научных и технических проблем повышения эффективности, надежности и качества современных технических систем различного назначения.

Целью диссертационной работы является развитие теории цифровой обработки информационных сигналов, разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов их цифровой обработки в параметрических дискретных базисах Фурье, обладающих функциональными возможностями по подавлению эффектов наложения, частотола, утечки и гребешкового эффекта во временной, частотной и корреляционной областях, которые присущи методам, основанным на дискретном преобразовании Фурье.

Основными задачами диссертационной работы, в соответствии с поставленной целью, являются:

- выявление научных и технических проблем современной цифровой спектральной обработки сложных и смешанных информационных сигналов методами и алгоритмами на основе дискретного преобразования Фурье;
- развитие теории, разработка методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки сложных и смешанных информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях на конечных интервалах в параметрических дискретных базисах Фурье;

¹¹ **Витязев В.В.** Вейвлет-анализ временных рядов. – СПб: Изд-во СПбГУ: 2001.-58 с.

- развитие теории, разработка методов и алгоритмов цифровой обработки мгновенных параметров смешанных информационных сигналов на конечных интервалах на основе параметрических дискретных преобразований Фурье;
- разработка быстрых процедур спектральной обработки информационных сигналов на основе параметрических дискретных преобразований Фурье;
- постановка и решение задач практической реализации разработанных методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки ИС в параметрических дискретных базисах Фурье.

Область исследования. Диссертационная работа выполнена в соответствии с пунктами «1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», «2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», «4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», паспорта специальности 05.13. 01 «системный анализ, управления и обработки информации».

Объектом исследования являются теория, методы и алгоритмы цифровой обработки информационных сигналов различного рода объектов.

Предметом исследования являются теория, методы и алгоритмы цифровой обработки на конечных интервалах информационных сигналов в параметрических дискретных базисах Фурье.

Методы исследований. Теоретическая часть работы выполнена на основе теории систем и системного анализа, теории информации, теории цифровой обработки сигналов, теории цифрового векторного и спектрального анализа, теории сигналов на конечных интервалах, теории матриц, теории вероятностей, теории математического моделирования, теории дискретного преобразования Фурье, теории дискретного параметрического преобразования Фурье, методологии проектирования технических систем. При расчетах и моделировании использовались программная среда проектирования инженерных приложений MATLAB и программно-инструментальная среда LabVIEW. Экспериментальные исследования проводились в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, приёмо-сдаточных испытаний в производственных условиях разработанных средств обработки информационных сигналов.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов и выводов: обеспечены строгими математическими доказательствами аналитических и стохастических свойств разработанных преобразований дискретных информационных сигналов и доказательством существования быстрых алгоритмов их реализации; подтверждены сопоставлением результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными путем моделирования и в условиях производства. Достигнутые результаты проведенных соискателем исследований развивают теорию цифровой обработки информационных сигналов объектов различного назначения, дополняют современные научные представления и данные отечественных и зарубежных информационных источников. Полученные результаты также подтверждаются их представительным обсуждением в научных изданиях и выступлениях на научных

конференциях международного и российского уровней. Научно-технические решения, полученные в результате диссертационного исследования, внедрены в производство.

Научная новизна. Основными результатами диссертационной работы является развитие теории, разработка методов и алгоритмов спектральной обработки информационных сигналов на конечных интервалах, обладающих расширенными функциональными возможностями и обеспечивающих выполнение требований к повышению эффективности и надежности, качеству создаваемых изделий и технических систем.

1. Впервые в практику спектральной обработки информационных сигналов введены следующие преобразования, разработанные и исследованные автором:

- параметрическое дискретное преобразование Фурье;
- модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье;
- аperiodическое дискретное преобразование Фурье;
- обобщенное дискретное преобразование Гильберта и его модификации;
- скользящее параметрическое дискретное преобразование Фурье.

2. Впервые в практику спектральной обработки информационных сигналов введено дискретно-частотное преобразование Фурье. Данная новая форма преобразования Фурье, предложенная автором, позволяет, поставив в соответствие дискретному сигналу, заданному на конечном интервале непрерывный сигнал, решить проблему *«эффекта частотола во временной области»*.

3. Разработаны методы цифровой блочной спектральной обработки информационных сигналов с накоплением, на основе которых проведено обобщение метода (алгоритма) Герцеля.

4. Предложены и исследованы обобщения дискретного преобразования Гильберта для измерения и обработки мгновенных параметров информационных сигналов, а также разработанные автором быстрые процедуры их реализации.

5. Проведено обобщение структуры гребенчатого фильтра, исследованы свойства обобщенного гребенчатого фильтра.

6. Разработаны теоретические основы обработки на конечных интервалах информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях в параметрических дискретных базисах Фурье.

7. Впервые предложены и исследованы быстрые алгоритмы обработки информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях в параметрических дискретных базисах Фурье.

Основные положения, выносимые на защиту. Положения, предложенные и обоснованные в диссертационном исследовании, в совокупности образуют

новое перспективное научное направление в области цифровой спектральной обработки информационных сигналов.

1. Преобразования для обработки информационных сигналов в корреляционной, частотной и частотно-временной областях:

- параметрическое дискретное преобразование Фурье;
- апериодическое дискретное преобразование Фурье;
- скользящее параметрическое дискретное преобразование Фурье.

Данные преобразования, позволяют в отличие от обработки информационных сигналов в классических дискретных базисах Фурье проводить обработку в корреляционной, частотной и частотно-временной областях не на фиксированных множествах частот, а на множестве частот, мощность которых регулируется параметрами соответствующих преобразований.

2. Преобразования для обработки информационных сигналов во временной области:

- модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье.

Данное преобразование, позволяет в отличие от обработки информационных сигналов во временной области в классических дискретных базисах Фурье проводить обработку не на фиксированном множестве моментов времени, а на множестве моментов времени, мощность которого регулируется параметром преобразования.

- модифицированное дискретное преобразование Гильберта;
- обобщенное дискретное преобразование Гильберта;
- модифицированное обобщенное дискретное преобразование Гильберта.

Отличием разработанных методов, полученных путем обобщений дискретного преобразования Гильберта, от стандартного дискретного преобразования Гильберта является учет свойства локальности данного преобразования, что позволило повысить точность измерения огибающих информационных сигналов минимум на порядок.

3. Методы цифровой блочной обработки с накоплением, на основе которых проведено обобщение метода Герцеля. Разработанные методы позволили проводить цифровую спектральную обработку информационных сигналов, как на целых, так и дробных частотах, обеспечив при этом высокую частотную разрешающую способность и устойчивость.
4. Обобщение структуры гребенчатого фильтра. В математической основе обобщенного гребенчатого фильтра лежит поворот нулей в комплексной плоскости амплитудно-частотной характеристики гребенчатого фильтра, что позволило сократить время цифровой обработки информационных сигналов, решить проблему погрешностей коэффициентов фильтров на основе частотной выборки, не теряя при этом одного из важнейших достоинств данного вида фильтров – возможности рекуррентного получения результатов фильтрации.

5. Эффект неинвариантности энергетического спектра действительных гармонических сигналов в классическом и параметрических базисах Фурье. Открытый автором эффект неинвариантности дает возможность оценить потенциальную точность обработки информационных сигналов в дискретных базисах Фурье.
6. Теоретические основы цифровой обработки информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях в параметрических дискретных базисах Фурье. Разработанные теоретические основы цифровой обработки информационных сигналов являются базой создания новых и совершенствования существующих методов повышения эффективности, надежности и качества технических систем в различных областях науки и техники.
7. Быстрые алгоритмы обработки информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях в параметрических дискретных базисах Фурье, которые могут быть применены без изменения структуры аппаратных средств, реализующих классические БПФ.

Практическая значимость, реализация и внедрение результатов диссертационной работы. Теоретические и прикладные результаты проведенных исследований позволили создать и внедрить соответствующие системы и приборы цифровой обработки ИС на производственных объединениях «Ижевский механический завод» и «ИЖМАШ», которые обеспечили повышение качества выпускаемой данными объединениями продукции.

Научные и прикладные результаты диссертационной работы апробированы и внедрены:

- в ОАО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов УР) при выполнении НИР по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по теме «Принципы контроля оптических сред в биологии и экологии с использованием методов обработки результатов измерений на основе квантификационных моделей»;
- в ОАО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов УР) при разработке системы «Совершенствование информационно-управляющей системы комплексной безопасности (ИУСКБ)»;
- при реализации Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации»;
- в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова» («ИжГТУ имени М.Т. Калашникова») на кафедре «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики» для студентов направления 12.03.01 «Приборостроение» специальности «Приборы и методы контроля качества и диагностики», магистрантов по программам подготовки 12.04.01–1 «Приборы, системы и изделия биомедицинского назначения», 12.04.01–2 «Приборы и методы контроля окружающей среды, веществ, материалов, изделий» по дисциплинам: «Математические основы обнаружения и фильтрации

сигналов», «Программные средства моделирования», «Обнаружение и фильтрация сигналов в неразрушающем контроле», «Специальные методы контроля», «Обнаружение и фильтрация сигналов в медицине», «Графические средства проектирования».

Внедрение результатов исследований подтверждено соответствующими актами.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические результаты диссертационной работы докладывались на 38 международных, всесоюзных и всероссийских научных конференциях: 12-й Всесоюзной школе – семинаре «Автоматическое распознавание слуховых образов (АРСО-12)», Киев, СССР, 1982 г.; Всесоюзной школе-семинаре «Распараллеливание обработки информации» (РОИ-83), Львов, СССР, 1983 г.; 13-й Всесоюзной школе – семинаре «Автоматическое распознавание слуховых образов (АРСО-13)», Новосибирск, СССР, 1984 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Методы и средства борьбы с помехами в цифровой технике», Вильнюс, СССР, 1986 г.; Всесоюзной конференции по информационной акустике, Москва, СССР, 1986 г.; Всесоюзном семинаре «Новые методы вибродиагностики технического состояния машин», Каунас, СССР, 1986 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Образное представление в управлении и научных исследованиях», Грозный, СССР, 1987 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Измерительные информационные системы», Ташкент, 1987 г.; Всесоюзной школе-семинаре «Распараллеливание обработки информации» (РОИ-87), Львов, СССР, 1987 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Методы и средства виброакустической диагностики машин», Ивано-Франковск, СССР, 1988 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Вибрация и вибродиагностика. Проблемы стандартизации», Горький, СССР, 1988 г.; 4-й Всесоюзной конференции «Математические методы распознавания образов» (ММРО-IV), Рига, СССР, 1989 г.; Всесоюзной научно-технической конференции «Вибрация и диагностика машин и механизмов», Челябинск, СССР, 1990 г.; Всесоюзном семинаре «Новые методы и средства виброакустических исследований и диагностики», Ленинград, СССР, 27-29 ноября 1990 г.; Всероссийской научно-технической конференции «Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация», Воронеж, Россия, 22-24 апреля 1997 г.; 4-й Международной научной конференции «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении», Тюмень, Россия, 9-11 декабря 2008 г.; 3-й Международной научной конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, Беларусь, 23-25 сентября 2009 г.; Всероссийской научной конференции «Физические основы диагностики материалов и изделий, и приборов для её реализации», Тюмень, Россия, 12-13 ноября 2010 г.; 3-й Международной научной конференции «Приборостроение-2010», Минск, Беларусь, 10-12 ноября 2010 г.; 9th International conference “Research, development and application of high technologies in the industry”, St.-Petersburg, Russia, 22-23 April 2010; 1th International conference “Modern information and electronic technologies” (MIET’2010), Odessa, Ukraine, 24-28 May, 2010; 12-й Международной научной конференции «Цифровая обработка

сигналов и её применение» (DSPA'2010), Москва, Россия, март 2010 г.; 12th International conference "Modern information and electronic technologies" (MIET'2011), Odessa, Ukraine, 23-27 May, 2011; Всероссийской научной конференции «Сессия научного совета по акустике РАН и XXIV сессия Российского акустического общества», Саратов, Россия, 12-15 сентября 2011 г.; 2-й Международной научной конференции «Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы», Курск, Россия, 11-13 апреля 2011 г.; 13-й Международной научной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA'2011), Москва, Россия, март 2011 г.; 7-й Всероссийской научной конференции «Приборостроение в 21 веке – 2011. Интеграция науки, образования и производства», Ижевск, Россия, 15-17 ноября 2011 г.; 8-й Всероссийской научной конференции «Приборостроение в 21 веке – 2012. Интеграция науки, образования и производства», Ижевск, Россия, 14-16 ноября 2012 г.; 4-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, Беларусь, 26-27 сентября 2012 г.; 13th International conference "Modern information and electronic technologies" (MIET'2012), Odessa, Ukraine, 4-8 June, 2012; 14-й Международной научной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA'2012), Москва, Россия, март 2012 г.; 15-й Международной научной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA'2013), Москва, Россия, март 2013 г.; 14-й Международной научной конференции «Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике», Новочеркасск, Россия, 14 марта 2014 г.; 16-й Международной научной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение» (DSPA'2014), Москва, Россия, март 2014 г.; 5-й Международной научно-технической конференции «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, Беларусь, 24-25 сентября 2014 г.; 7-й Международной научной конференции «Приборостроение-2014», Минск, Беларусь, 19-21 ноября 2014 г.; 17-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2015)», Москва, Россия, 2015 г.; 8-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2015», Минск, Беларусь, 2015, 18-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2016)», Москва, Россия, 2016 г.

Публикация результатов диссертации. По материалам диссертации опубликовано более 100 печатных работ, из них монография без соавторов, 7 статей в журналах, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования *Scopus*, 11 статей в журналах, составляющих ядро коллекции Российского индекса научного цитирования *Science Index* (РИНЦ), которое размещено на платформе *Web of Science* как *Russian Science Citation Index* (RSCI), 27 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, из которых 7 научных работ [4, 5, 8, 19, 20, 23, 24] выполнены соискателем лично, остальные в соавторстве.

Основные научные результаты, изложенные в диссертационном исследовании, получены соискателем лично и представляют собой обобщение более чем тридцатилетнего опыта работы автора в области развития теории цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье, разработки в различных предметных областях соответствующих методов, алгоритмов и средств цифровой обработки информационных сигналов.

В статьях по теме диссертации, опубликованных в журналах, входящих в перечень ВАК РФ рецензируемых научных изданий, и выполненных в соавторстве [1-3, 6, 7, 9-18, 21, 24-27] соискателю принадлежит: разработка преобразований для обработки информационных сигналов в корреляционной, частотной и частотно-временной областях: параметрическое дискретное преобразование Фурье; апериодическое дискретное преобразование Фурье; скользящее параметрическое дискретное преобразование Фурье [2, 14, 18, 21, 24, 25]; разработка преобразований для обработки информационных сигналов во временной области: модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье, модифицированное дискретное преобразование Гильберта; обобщенное дискретное преобразование Гильберта; модифицированное обобщенное дискретное преобразование Гильберта [3, 26, 27]; методы цифровой блочной обработки с накоплением [11, 16]; обобщение структуры гребенчатого фильтра [9]; открытие и исследование эффекта неинвариантности энергетических спектров в классическом и параметрических базисах Фурье [17]; разработка теоретических основ цифровой обработки информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях в параметрических дискретных базисах Фурье [6, 7, 13, 15]; разработка быстрых алгоритмов обработки информационных сигналов в параметрических дискретных базисах Фурье [3, 12, 21]. Остальные результаты в статьях, выполненных в соавторстве, принадлежат соавторам. Вклад научного консультанта В.А. Алексеева, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Удмуртской Республики определяется рамками научного консультирования и обсуждения результатов исследований, проводимых автором.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 235 наименований и 3 приложений. Общий объем работы – 357 страниц, включая 93 рисунка и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены области и основные направления исследований, обоснована важность и актуальность темы диссертационной работы, определены объект и предмет исследования, цель и задачи диссертационной работы, показаны научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, рассмотрены достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов.

В первой главе рассмотрены область, объект и предмет исследования. Сформулированы: проблема разработки методов и алгоритмов цифровой

спектральной обработки информационных сигналов, цель и задачи исследований. Дана обобщенная математическая частотная модель ИС, полученная путем обобщения математических частотных моделей ИС, применяемых в различных предметных областях.

На современном этапе развития информационных технологий происходит интенсивный переход на методы и алгоритмы (МиА) цифровой обработки информационных сигналов на конечных интервалах (ЦОИС), так как данный вид обработки играет ключевую роль в достижении высокой эффективности разработки, производства и эксплуатации современных изделий и систем. В результате наблюдается постоянное расширение спектра предметных областей приложений МиА ЦОИС, среди которых можно назвать виброакустическое функциональное диагностирование механических объектов, экологическая безопасность, компьютерная медицинская диагностика, пассивная и активная гидролокация, сейсмология. В этих и многих других областях научных исследований характерной спецификой ИС является: наличие в структуре ИС скрытых периодических¹², почти периодических¹³ и ангармонических сигналов¹⁴ (скрытых периодичностей, почти периодичностей и ангармонических периодичностей), параметры которых являются важными носителями информации о состоянии исследуемых объектов, свойствах анализируемых явлений и процессов. При этом проведение измерений¹⁵ является частью систем ЦОИС, и в мировой практике общепринято считать ИС *носителями общей измерительной информации*. Отметим, что класс смешанных ИС относится к классу случайных ИС со сложной структурой, измерение параметров которых, носит статистический характер и в общей теории измерений либо рассматривается фрагментарно, либо не рассматривается вообще. Для описания данного класса ИС, требуется использование не только временной формы, но и корреляционной, частотной и частотно-временной форм представления (*включая применение частотных и частотно-временных математических моделей*). Для обработки данного класса ИС необходима разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки ИС, поиск наиболее адекватных базисных систем, обеспечивающих оптимальное решение научных и технических проблем

¹² **Периодический сигнал** – полигармонический сигнал частоты, представляющий собой сумму гармонических компонент, частоты k_i , которых соизмеримы.

¹³ **Почти периодический сигнал** – полигармонический сигнал частоты, представляющий собой сумму гармонических компонент, частоты k_i , которых несоизмеримы.

¹⁴ **Ангармонический сигнал** – периодический сигнал, представляющий собой сумму основного гармонического сигнала (гармонического сигнала наименьшей частоты) и некоторых его гармоник (гармонических сигналов более высоких частот, частоты которых кратны частоте основного гармонического сигнала).

¹⁵ **Измерение** – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины (РМГ 29-99).

повышения эффективности, надежности и качества технических систем на всех этапах их жизненного цикла. В практике ЦОИС наибольшее применение получила базисная система дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ):

$$\text{def}(p, l) = \exp(-j \frac{2\pi}{N} pl) = W_N^{pl} = \cos(\frac{2\pi}{N} pl) - j \sin(\frac{2\pi}{N} pl); \quad p, l = \overline{0, N-1}. \quad (1)$$

Данная базисная система является полной системой¹⁶ и обладает целым рядом преимуществ перед другими базисными системами. Отметим также два важнейших свойства ДЭФ, которые предопределили в значительной степени исключительную роль этого базиса в обработке ИС: инвариантность базиса к циклическому сдвигу и его мультипликативность по обоим переменным (1). В настоящее время дискретные преобразования Фурье (ДПФ):

$$\text{прямое ДПФ: } S_N = \frac{1}{N} F_N X_N, \quad \text{обратное ДПФ (ОДПФ): } X_N = F_N^* S_N, \quad (2)$$

где * – знак комплексного сопряжения, $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – представление дискретного сигнала $x(n)$, $n = \overline{0, N-1}$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования; $S_N = [s(0), s(1), \dots, s(N-1)]^T$ – вектор коэффициентов разложения X_N по системе ДЭФ, задаваемой матрицей F_N :

$$F_N = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \cdot & \cdot & (N-1) & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdot & \cdot & 1 \\ 1 & W_N^1 & \cdot & \cdot & W_N^{(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & W_N^{(N-1)} & \cdot & \cdot & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (3)$$

основанные на базисе ДЭФ, с учетом существования алгоритмов быстрого преобразования Фурье (алгоритмов БПФ) занимают важное место в цифровой спектральной обработке ИС на конечных интервалах. Однако, ДПФ наряду с достоинствами имеет и ряд **принципиальных недостатков**, связанных с проявлением при практическом его применении в обработке ДИС, ряда специфических эффектов, присущих данному преобразованию (**эффект наложения, эффект частоты, эффект утечки, гребешковый эффект**). Принципиальные недостатки ДПФ, существенно ограничивающие его использование в ЦОИС были основной причиной разработки альтернативных методов цифровой спектральной обработки ИС (неклассических методов цифровой спектральной обработки ИС), которые в свою очередь обладают существенными недостатками (например, получаемые оценки менее устойчивы,

¹⁶ Трахтман А.М. Введение в обобщенную спектральную теорию /А.М.Трахтман. М.: Сов.радио. 1972, 352 с.

чем оценки при классических методах цифровой спектральной обработки ИС). В главе рассмотрены вопросы спектральной обработки случайных и смешанных ИС на основе статистических измерений их вероятностных характеристик. Показано, что предлагаемое автором **развитие теории цифровой спектральной обработки информационных сигналов** на конечных интервалах можно рассматривать, в том числе, и как **развитие теории статистических измерений**, основы которой изложены в работах Цветкова Э.И.¹⁷.

Рассматривая системный анализ как методологию решения крупных проблем,¹⁸ в главе сформулирована научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение – проблема развития теории цифровой спектральной обработки информационных сигналов в базисе Фурье, разработки новых и совершенствования существующих методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки, а также задачи исследования диссертационной работы. С формальной точки зрения под проблемой H понимается множество¹⁹:

$$H = \{Q, F, V\}; \quad (5)$$

где $Q = \{Q_i\}$ – множество целей, достижение которых разрешает проблему;
 $F = \{F_j\}$ – множество свойств проблемы; $V = \{V_k\}$ – множество гипотез разрешения проблемы.

Разрешение проблемы, опирающееся на системный анализ, предполагает разработку последовательности операций (этапов), направленную на устранение расхождения (разницы) между необходимым (желаемым) и реальным (существующим) путем выбора предпочтительной альтернативы (гипотезы) решения проблемы. На рисунке 1. приведена структурная схема поэтапного разрешения научной проблемы развития теории, создания новых методов и алгоритмов спектральной обработки информационных сигналов и совершенствования существующих методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки в базисе Фурье, которая разработана автором на базе системного анализа. В качестве рабочей принята следующая гипотеза разрешения поставленной проблемы: развитие теоретических основ классических методов цифровой спектральной обработки ИС, разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки ИС, поиск базисных систем альтернативных системе ДЭФ.

Во второй главе излагаются теоретические основы и методы ЦОИС со скрытыми периодичностями на конечных интервалах в параметрических дискретных базисах Фурье. В главе исследованы аналитические свойства следующих преобразований, предложенных автором: параметрического

¹⁷ Цветков Э.И. Основы теории статистических измерений / Э.И.Цветков.-Л.: Энергия, 1979.- 288 с.

¹⁸ Никаноров С.П. Системный анализ: этап развития методологии решения проблем в США. http://or-rsv.net/Concept/Nikanorov_003.htm.

¹⁹ Дружинин В.В., Кантор Д. С. Проблемы системологии (проблемы теории сложных систем).–М.: Сов.Радио,1976.–296 с.

дискретного преобразования Фурье, модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье, скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье. В главе рассмотрена и исследована инвариантность скользящего энергетического спектра действительного гармонического ИС в параметрических базисах Фурье.

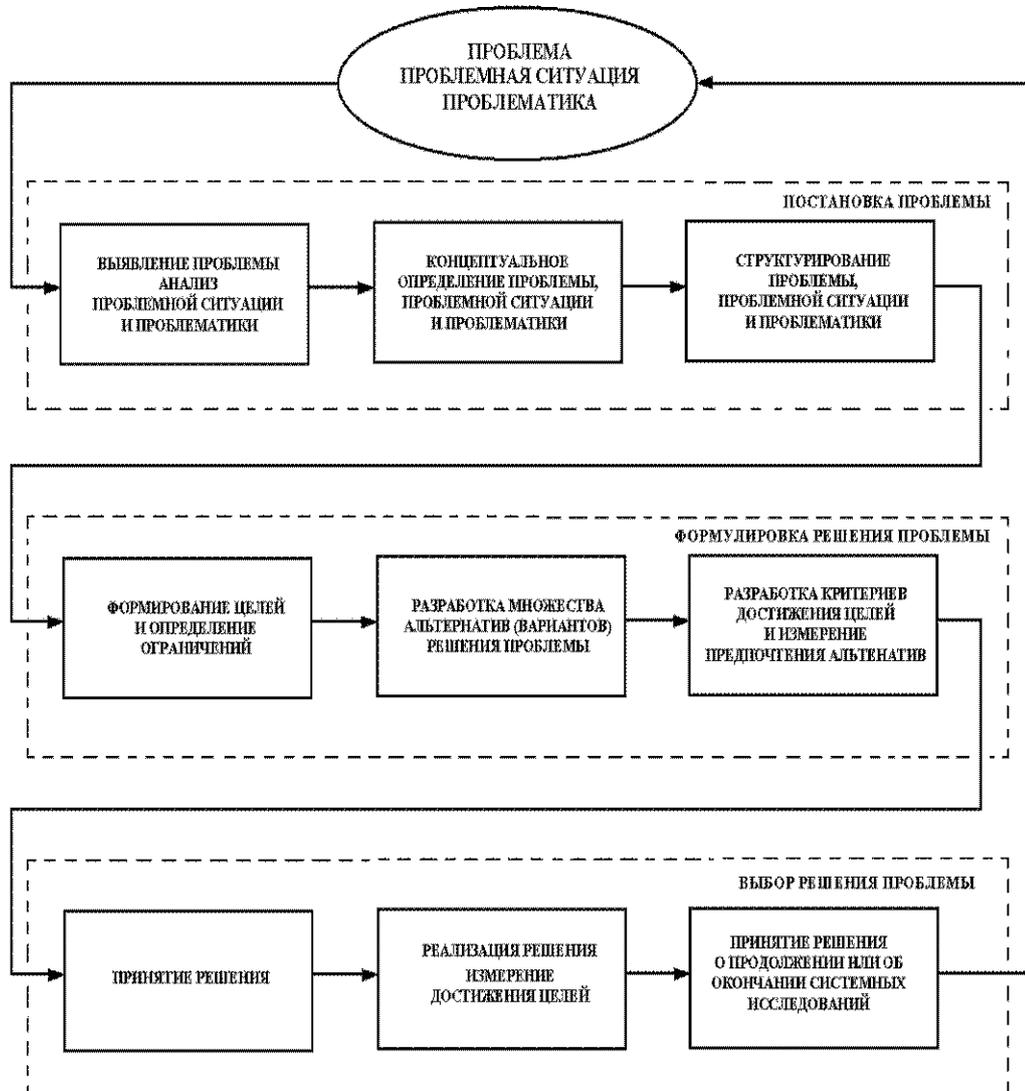


Рисунок 1 – Структурная схема поэтапного разрешения проблемы создания методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки информационных сигналов

Предложены методы ЦОИС на основе обобщения метода (алгоритма, фильтра) Герцеля.

В главе исходя из того, что ИС являются носителями общей измерительной информации, дана оценка роли и места ДПФ в общей теории измерений. Известно, что линейные косвенные измерения²⁰ – это измерения, при которых искомое значение величины Q находят на основании известной линейной функциональной зависимости:

²⁰ Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология: Учебное пособие для вузов.–М.: Логос, 2002.– 408 с.: ил.

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot Q_i, \quad (6)$$

где b_i – постоянный коэффициент i -го аргумента Q_i ; $Q_i, \overline{i=1, m}$ – значения величин, полученные при прямых измерениях; m – число аргументов.

Сравнивая (2) и (6), нетрудно видеть, что каждое k -е, $k=0, \overline{(N-1)}$, значение частотного спектра (каждое значение коэффициента (бина) ДПФ на определенной частоте $\frac{2\pi}{N} \cdot k$) может быть интерпретировано как **линейное косвенное измерение**, в котором в качестве функциональной линейной зависимости используется дискретная базисная функция ДПФ определенной частоты.

В главе показано, что применение известных методов уменьшения принципиальных недостатков ДПФ, к сожалению, не решает проблемы нежелательных эффектов ДПФ. Для решения указанной проблемы предложено обобщение ДПФ в виде **параметрического дискретного преобразования Фурье (ДПФ-П)**, которое представляет собой разложение дискретного сигнала по базису параметрических дискретных экспоненциальных функций (ДЭФ-П):

$$def_p(k, n, \theta) = W_N^{(k+\theta)n} = \exp\left[-j \frac{2\pi}{N} (k+\theta)n\right], \quad 0 \leq \theta < 1; \quad (7)$$

и определяется в матричной форме следующим соотношением:

$$S_{N,\theta} = \frac{1}{N} F_{N,\theta} X_N, \quad 0 \leq \theta < 1, \quad F_{N,\theta} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & \dots & (N-1) & n \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ (N-1) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & W_N^\theta & \dots & W_N^{\theta(N-1)} \\ 1 & W_N^{(1+\theta)} & \dots & W_N^{(1+\theta)(N-1)} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ 1 & W_N^{(N-1+\theta)} & \dots & W_N^{(N-1+\theta)(N-1)} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (8)$$

где $X_N = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$ – представление дискретного сигнала $x(n)$, $n=0, N-1$, в виде вектора N -мерного линейного пространства; T – знак транспонирования; $S_{N,\theta} = [s(0, \theta), s(1, \theta), \dots, s((N-1), \theta)]^T$ – вектор коэффициентов разложения X_N по системе ДЭФ-П, задаваемой матрицей $F_{N,\theta}$.

В главе исследованы основные аналитические свойства ДЭФ-П, доказана справедливость теорем линейности, сдвига, корреляции и теоремы Парсеваля для ДПФ-П и приведено доказательство существования обратного ДПФ-П (ОДПФ-П). Проведено обобщение понятия периодичности сигнала в виде **параметрической периодичности сигнала**:

$$x_\theta(n) = x(n \bmod N) W_N^{\theta N \text{ent}[n/N]}, \quad \text{где } \text{ent}[\cdot] \text{ – символ взятия целой части.}$$

В теорию дискретных измерений спектров детерминированных сигналов на конечных интервалах автором введена новая форма преобразования Фурье – **дискретно-частотное преобразование Фурье (ДЧПФ)**, которое ставит в

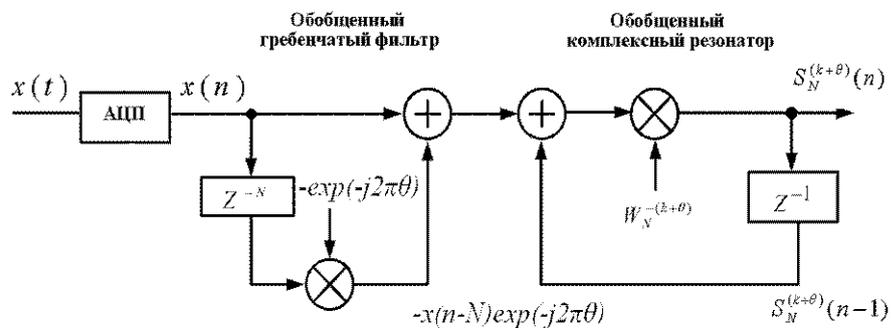
соответствие дискретному ИС $x(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ непрерывный ИС $x(t)$. Введение ДЧПФ позволило доказать существование во временной области нежелательных эффектов аналогичных эффектам наложения и частотола, утечки и гребешкового эффекта в частотной области, а также предложить методы борьбы с ними. В главе показано, что исходный ИС $x(n)$, $n = \overline{0, N-1}$ является только одним из множества возможных дискретных временных спектров ИС, соответствующих непрерывному ИС $x(t)$. Для определения множества временных спектров ИС, соответствующих непрерывному ИС $x(t)$, разработано **модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье** (МДПФ-П), которое в алгебраической форме задается соотношением:

$$x(n, \xi) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S_N(k) W_N^{-k(n+\xi)}, \quad k = \overline{0, N-1}. \quad (9)$$

Для определения частотно-временного спектра ИС на определенной частоте (в скользящем окне в N отсчетов) предложено **скользящее параметрическое ДПФ** (СДПФ-П), с разностным уравнением:

$$S_N^{(k+\theta)}(n) = W_N^{-(k+\theta)} \left[S_N^{(k+\theta)}(n-1) + x(n) - x(n-N) \exp(-j2\pi\theta) \right], \quad (10)$$

которое, в отличие от стандартного СДПФ, дает возможность получения частотно-временного спектра не на фиксированных частотах, а из набора частот, число которых варьируется параметром θ : $\{2\pi(k+\theta)/N\}$, $k = \overline{0, N-1}$, $0 \leq \theta < 1$. СДПФ-П может быть реализовано в виде **обобщенного БИХ-фильтра**, структура которого приведена на рисунке 2.



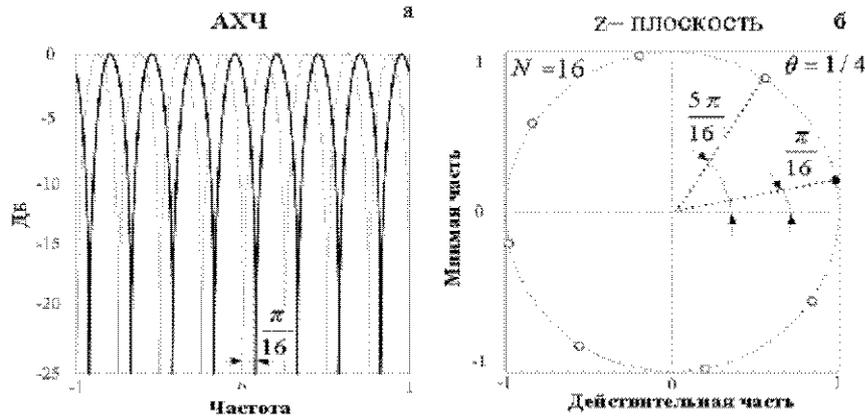
АЦП – аналого-цифровой преобразователь,

z^{-q} – задержка дискретного сигнала на q отсчетов.

Рисунок 2 – Структура обобщенного БИХ-фильтра, реализующего СДПФ-П на $(k + \theta)$ -й частоте при $0 \leq \theta < 1$

В структуре обобщенного БИХ-фильтра (рисунок 2), по сути, предложено и **обобщение структуры гребенчатого фильтра**, которое позволяет осуществлять поворот распределения нулей АЧХ гребенчатого фильтра на угол $\frac{2\pi}{N}\theta$ (рисунок

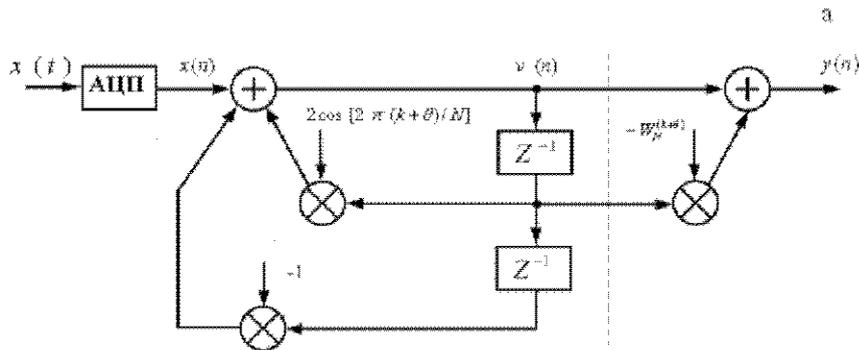
3). Предложенное обобщение структуры гребенчатого фильтра позволяет решить проблему погрешностей коэффициентов обобщенного БИХ-фильтра, не теряя при этом одно из важных достоинств данного вида фильтров – возможности рекуррентного получения скользящих значений спектра входного сигнала.



а – амплитудно-частотные характеристики (АХЧ) гребенчатых фильтров (светлой линией изображена АХЧ стандартного гребенчатого фильтра); б – распределение нулей

Рисунок 3 – Характеристики обобщенного гребенчатого фильтра

В главе дано обобщение метода (алгоритма, фильтра) Герцеля и предложено два варианта реализации измерительной процедуры, одна из которых приведена на рисунке 4.



АЦП – аналого-цифровой преобразователь,

z^{-1} – задержка дискретного сигнала на 1 отсчет

Рисунок 4 – Структура БИХ-фильтра, реализующего обобщенный алгоритм Герцеля на $(k + \theta)$ -й частоте при $0 \leq \theta < 1$

В главе приведены результаты исследования разработанных автором процедур **цифровой блочной обработки с накоплением** (ЦБОН) результатов измерений частотного спектра, полученных стандартным и обобщенным методом Герцеля. Процедура основана на свойствах ДЭФ и ДЭФ-П. Применение ЦБОН обеспечивает: высокую разрешающую способность метода, за счет увеличения длительности обрабатываемого входного сигнала до $N \cdot s$ отсчетов, а также устойчивость работы стандартного и обобщенного фильтра Герцеля, за счет обнуления всех внутренних регистров памяти в начале выполнения операции обработки каждого из s блоков в N отсчетов.

В главе изложены результаты исследования **инвариантности** скользящего энергетического спектра действительного гармонического сигнала в базисе ДПФ. Доказано, что предположение об инвариантности скользящего энергетического спектра Фурье ИС, лежащее в основе многих методов обработки сложных, случайных и смешанных ИС в частотной и частотно-временной

областях, не является справедливым. В общем случае *энергетический спектр действительного гармонического сигнала не инвариантен временному сдвигу*. В главе приведены свойства и характеристики открытого автором «*эффекта неинвариантности*» («*non-invariance*»).

В третьей главе излагаются теоретические основы и методы цифровой обработки случайных информационных сигналов (стационарных по А.Я. Хинчину) в параметрических базисах Фурье. Предложено аperiodическое дискретное преобразование Фурье (АДПФ), исследованы стохастические свойства ДПФ-П, а также аналитические и стохастические свойства АДПФ.

В рамках корреляционной теории дискретных стационарных в широком смысле (стационарных по А.Я. Хинчину) информационных сигналов (ДСИС) исторически сложилось два взаимосвязанных (но не подменяющих друг друга) направления развития цифровой обработки на конечных интервалах стационарных в широком смысле случайных ИС: спектральный подход (часто называемый частотным или гармоническим подходом) и корреляционный подход (называемый также временным подходом). Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Однако с появлением алгоритмов БПФ спектральный подход получил дополнительное преимущество перед корреляционным подходом. Оказалось, что цифровую обработку ИС эффективнее проводить непосредственно в спектральной области, в дальнейшем (при необходимости) переходя в корреляционную область с помощью обратного БПФ. Именно поэтому в диссертационном исследовании при разработке теоретических основ ЦОИС в параметрических базисах Фурье спектральный подход выбран в качестве основного.

В корреляционной теории цифровой обработки ИС объектом является совокупность (ансамбль) реализаций ИС:

$$X(n) = \{x_i(n)\}, \quad (11)$$

$$\text{где } [i = \overline{1, \infty}; n = \overline{1, \infty}] \vee [i = \overline{1, \infty}; n \in \{n\}] \vee [i \in \{i\}; n = \overline{1, \infty}],$$

а теоретико-вероятностные характеристики ДСИС определяются через пределы выборочных средних.

В разрабатываемой теории цифровой обработки ДСИС $X(n)$, заданных на конечном интервале $n = \overline{(0, N-1)}$ применяются следующие оценки характеристик ДСИС:

$$\text{для математического ожидания } M_X: M_{X,N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X(n); \quad (12)$$

для аperiodической корреляционной функции $K_X(r)$:

$$K_{X,N}(r) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-|r|} [X(n) - M_{X,N}][X(n+|r|) - M_{X,N}], & 0 \leq |r| \leq N-1; \\ 0 & |r| > N-1 \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{для дисперсии } D_X: D_{X,N} = K_{X,N}(0); \quad (14)$$

для энергетического спектра $\Gamma_X(k)$:

$$G_{X,N}(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} X(n) W_N^{(k)n} \right|^2; W_N = \exp(-j2\pi/N); k = \overline{(0, N-1)}; \quad (15)$$

для параметрического энергетического спектра $\Gamma_X(k, \theta)$:

$$G_{X,N}(k, \theta) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} X(n) W_N^{(k+\theta)n} \right|^2; W_N = \exp(-j2\pi/N); k = \overline{(0, N-1)}; 0 \leq \theta < 1, \quad (16)$$

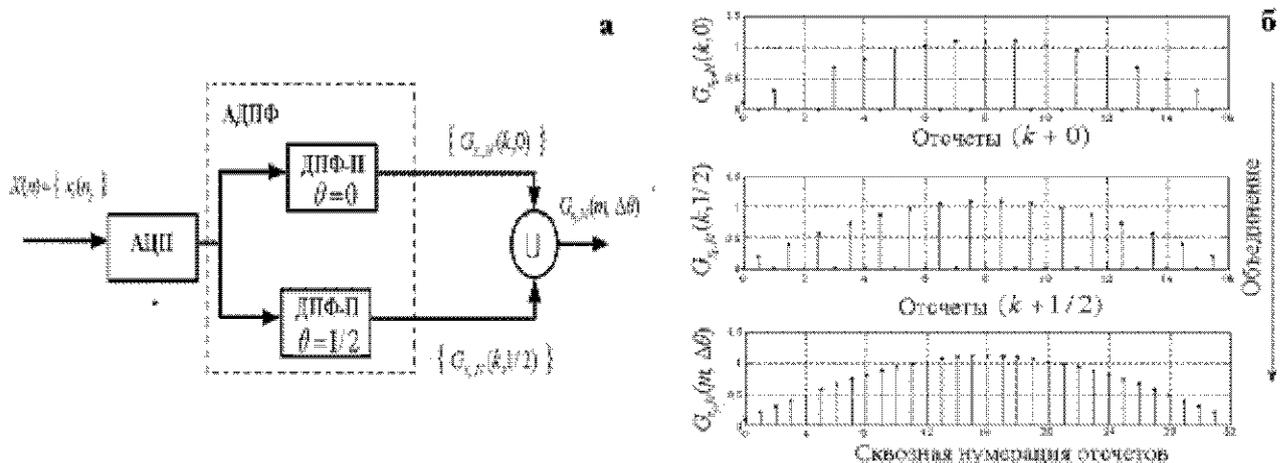
где M_X , $K_X(r)$, D_X , $\Gamma_X(k)$, $\Gamma_X(k, \theta)$ – истинные (теоретические) значения теоретико-вероятностных характеристик ДСИС («the theoretical value»); $M_{X,N}$, $K_{X,N}(r)$, $D_{X,N}$, $G_{X,N}(k)$, $G_{X,N}(k, \theta)$ – оценки, теоретико-вероятностных характеристик ДСИС, рассматриваемые как случайные величины («estimators»).

Оценки аperiodической корреляционной функции и энергетического спектра центрированного ДСИС (т.е. с $M_X = 0$), полученные согласно (13) и (15) в конкретном эксперименте (выборочные оценки – $K_{x,N}(r)$ и $G_{x,N}(k)$, «estimates»), задаются следующими соотношениями:

$$K_{x,N}(r) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-|r|} x(n) \cdot x(n+|r|); & 0 \leq |r| \leq N-1; \\ 0 & |r| > N-1 \end{cases} \quad (17)$$

$$G_{x,N}(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot W_N^{(k)n} \right|^2; \quad k = \overline{(0, N-1)}. \quad (18)$$

В главе показано, что дискретность ДСИС и конечность интервала их определения (N -интервала) приводят к тому, что соотношения (17) и (18) не связаны известной теоремой Винера-Хинчина. В связи с чем метод повышения эффективности обработки ИС, подвергшихся линейным преобразованиям, предложенный В.С. Пугачевым, не применим к ДСИС. Для решения возникших проблем предложено **aperiodическое дискретное преобразование Фурье**, которое представляет собой объединение двух параметрических дискретных преобразований Фурье при значениях параметра $\theta = 0, 1/2$ (рисунок 6 а, б).



- а – получение спектра $G_{x,N}(m, \Delta\theta)$ путем объединения спектров $G_{x,N}(k, 1/2)$;
 б – $G_{x,N}(k, 0)$; $N = 32$; $\Delta\theta = 1/2$, $m = \overline{0, 31}$, $k = \overline{0, 15}$

Рисунок 6 – Структура аperiodического дискретного преобразования Фурье

В качестве характеристики статистической устойчивости (робастности) частотных и частотно-временных энергетических спектров в теории цифровой обработки ДСИС выбрано число степеней свободы $\nu(k, \theta)$.

$$\nu(k, \theta) = \frac{2M^2 [G_{x,N}(k, \theta)]}{D [G_{x,N}(k, \theta)]}; \quad (19)$$

Доказано, что число степеней свободы для дискретного белого шума с нормальной плотностью распределения, математическим ожиданием $M_x = 0$ и дисперсией D_x , заданного на N -интервале, равно:

$$\nu(k, \theta) = \frac{2}{1 + \left\{ \sin^2[2\pi(k + \theta)] / N^2 \sin^2 \left[\frac{2\pi}{N}(k + \theta) \right] \right\}}; \quad k = \overline{0, N/2}; 0 \leq \theta < 1 \quad (20)$$

Вид функции $F_1(k, \theta) = \frac{\sin[2\pi(k + \theta)]}{N \sin[2\pi(k + \theta)/N]}$ приведен на рисунке 7.

Из соотношения (20) и поведения функции $F_1(k, \theta)$ непосредственно следует, что при значениях параметра $\theta = 0$ и $\theta = 1/2$ число степеней свободы $\nu(k, \theta)$ в точности равно двум, т.е. не только при $\theta = 0$, как утверждается в зарубежной и отечественной научной литературе.

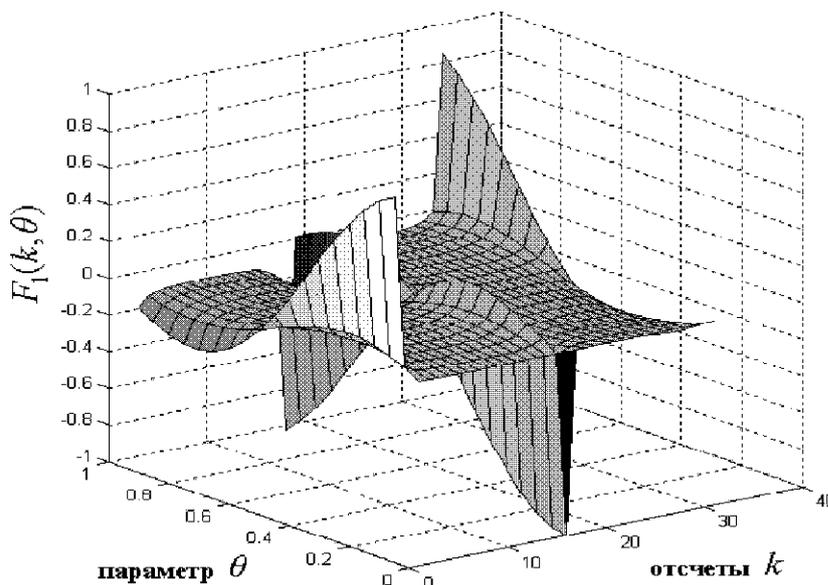


Рисунок 7 – Значения функции $F_1(k, \theta)$ для $N = 32$ при шаге по параметру $\theta = 0.05$

В главе рассмотрены также два больших класса задач, решение которых требует применения разных статистических методов: задачи обработки энергетических спектров ДСИС, в целом как функции частоты (интегральный подход), и задачи обработки энергетических спектров ДСИС в некотором узком

диапазоне частот (локальный подход). Исследован вопрос специфики цифровой обработки ИС смешанной структуры в параметрических базисах Фурье.

В четвертой главе излагаются теоретические основы цифровой обработки мгновенных параметров дискретных информационных сигналов. Исследованы следующие преобразования, разработанные автором работы для измерения и обработки на конечных интервалах мгновенных параметров ИС: модифицированное дискретное преобразование Гильберта, обобщенное дискретное преобразование Гильберта, модифицированное обобщенное дискретное преобразование Гильберта.

Действительный периодичный дискретный ИС $x(n)$, $n = \overline{(0, N-1)}$, может быть представлен в виде суммы дискретных гармонических компонент (**Фурье - анализ**):

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N/2+1} A_k \cdot \cos(2\pi kn / N + \varphi_k); \quad (21)$$

где $A_k = |S_N(k)|$ – амплитуда k -й гармонической компоненты; $2\pi \cdot k / N$ – нормированная частота k -й гармонической компоненты; $\varphi_k = \arctg \{ \text{Im}[S_N(k)] / \text{Re}[S_N(k)] \}$ – фаза k -й гармонической компоненты,

или в виде, использующем мгновенные параметры действительного дискретного ИС $x(n)$ (часто называемом при узкополосном сигнале: $x(n)$ – векторным анализом):

$$x(n) = A(n) \cdot \cos[\Phi(n)]; \quad (22)$$

где $A(n)$ – мгновенная амплитуда ИС (огibaющая ИС); $\Phi(n)$ – мгновенная фаза ИС;

Представление дискретного ИС в виде (22), как и представление (21) нашло широкое применение, в связи с тем, что параметры гармонических составляющих огibaющих ИС, в свою очередь, также являются носителями важной информации о свойствах и состояниях исследуемых объектов, явлений и процессов. В основе метода цифровой обработки ИС (22) лежит дискретное преобразование Гильберта, которое для действительного дискретного ИС $x(n)$, заданного на конечном интервале $n = \overline{(0, N-1)}$, можно найти с помощью алгоритма на основе ДПФ (рисунок 8).

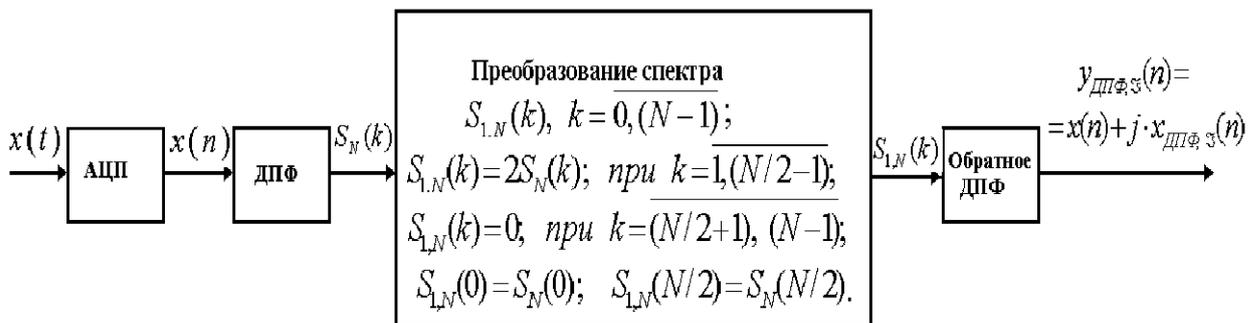


Рисунок 8 – Структура алгоритма получения гильбертова ИС методом ДПФ

Комплексный сигнал: $y_3(n) = x(n) + j \cdot x_3(n)$ является дискретным гильбертовым сигналом и позволяет **однозначно определить огибающую** (мгновенную амплитуду) действительного дискретного ИС $x(n)$:

$$A(n) = \sqrt{x^2(n) + x_3^2(n)}.$$

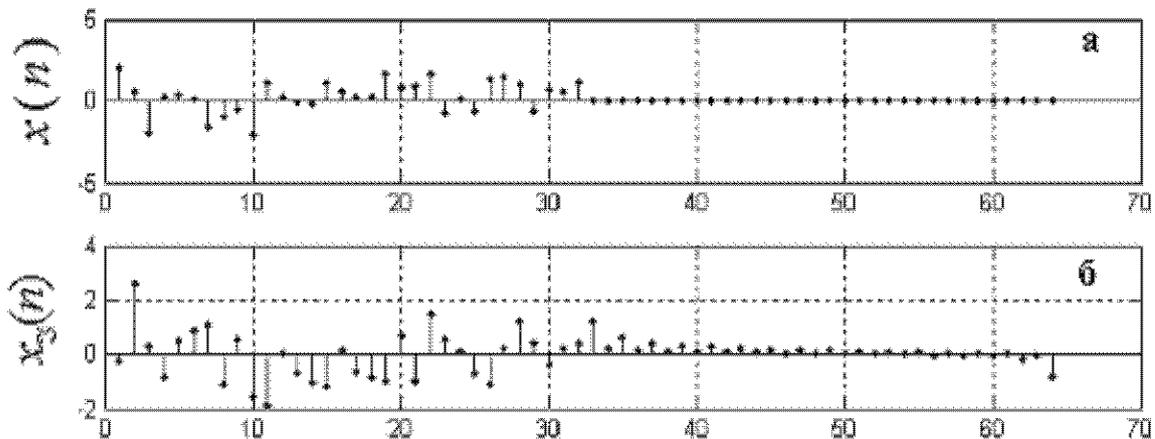
Подчеркнем, что понятия **мгновенной частоты** сигнала и **частот** его гармонических составляющих – это принципиально различные понятия, смещение которых во многом определило возникновение в тридцатых годах прошлого столетия серьезных (категоричных и резких по форме) научных дискуссий²¹ между сторонниками представлений (21) и (22).

Известным недостатком дискретного преобразования Гильберта (ДПГ) является отсутствие у данного преобразования свойства локальности. ДПГ лишь **асимптотически локальное преобразование** с ядром вида $\frac{\sin(N \cdot x/2)}{N \sin(x/2)}$.

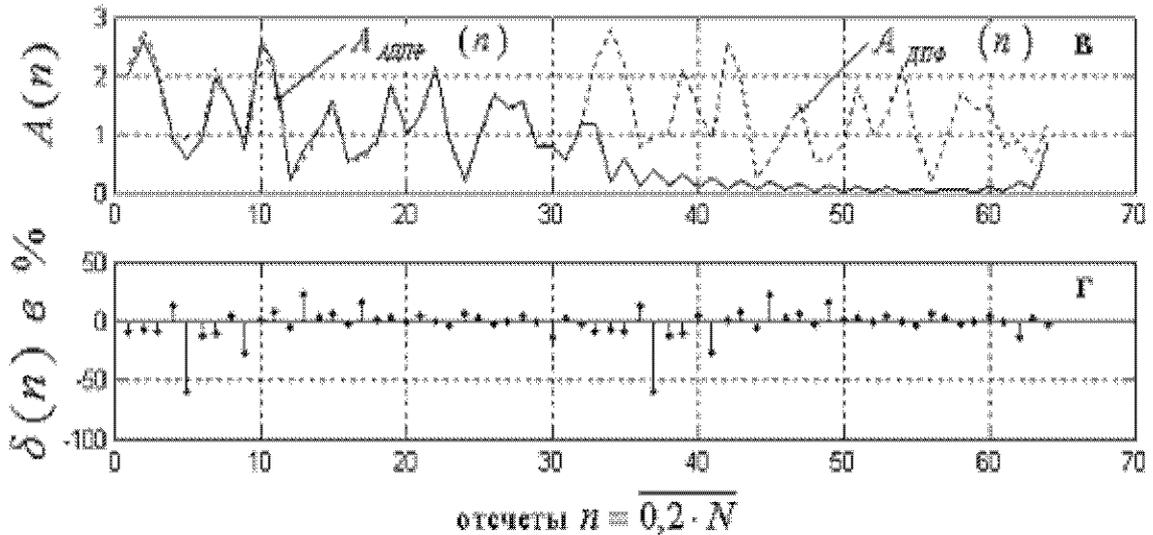
Это обстоятельство приводит к тому, что сопряженный сигнал $x_3(n)$, $n = \overline{(0, N-1)}$, полученный методом ДПГ действительного сигнала $x(n)$, $n = \overline{(0, N-1)}$ (рисунок 8), представляет собой **результат наложения во временной области гипотетического сопряженного сигнала** $x_{1,3}(n)$, $n = \overline{(0, \infty)}$.

Как показал анализ, в практике обработки огибающих ИС отсутствие свойства локальности у ДПГ не принимается во внимание (часто над этим просто не задумываются), что приводит к существенной потере точности измерения мгновенных параметров ИС.

На рисунке 9 путем сравнения огибающих ИС, полученных методами ДПФ и АДПФ, проиллюстрировано, что относительная погрешность измерения огибающей ИС на конечном интервале методом ДПФ в сравнении с методом АДПФ-П может составлять 50 и более процентов.



²¹ Финк Л.М. Сигналы. Помехи. Ошибки.. /Л.М.Финк.-2-е изд., перераб. и доп.-М.: Радио и связь, 1984.- 256 с



а – исходный сигнал $x(n)$, $n = \overline{(0, (2 \cdot N - 1))}$; б – сопряженный $x_3(n)$, $n = \overline{(0, (2 \cdot N - 1))}$;

в – огибающие $A_{ДПФ}(n)$ и $A_{ДПФ-П}(n)$ (условно показаны соответственно пунктиром и сплошной линией); г – относительная погрешность измерения огибающей $A_{ДПФ-П}$ на N -интервале методом ДПФ: $\delta(n) = \{[A_{ДПФ-П}(n) - A_{ДПФ}(n)] / A_{ДПФ-П}(n)\} \cdot 100$, в %.

Рисунок 9 – Измерение огибающей ИС методами ДПФ и ДПФ-П

Следующим шагом повышения точности обработки мгновенных параметров дискретных ИС является обобщение структуры алгоритма (рисунок 8) путем перехода от ДПФ к ДПФ-П.

Структура алгоритма получения дискретного гильбертова ИС методом ДПФ-П приведена на рисунке 10.

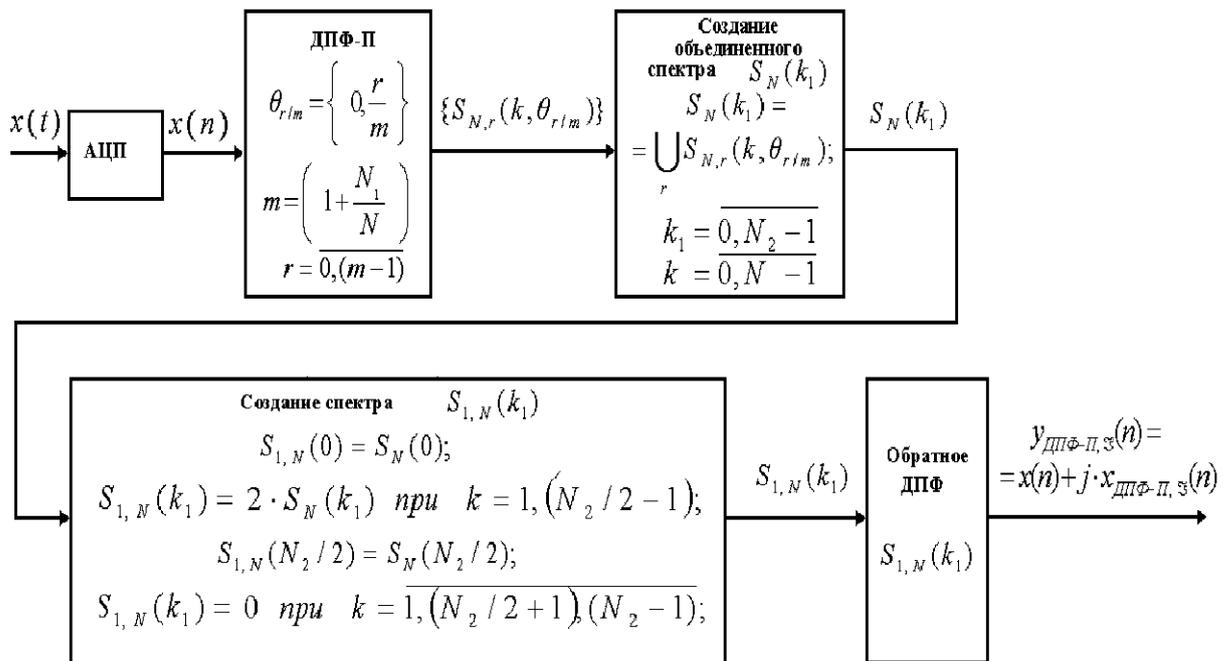
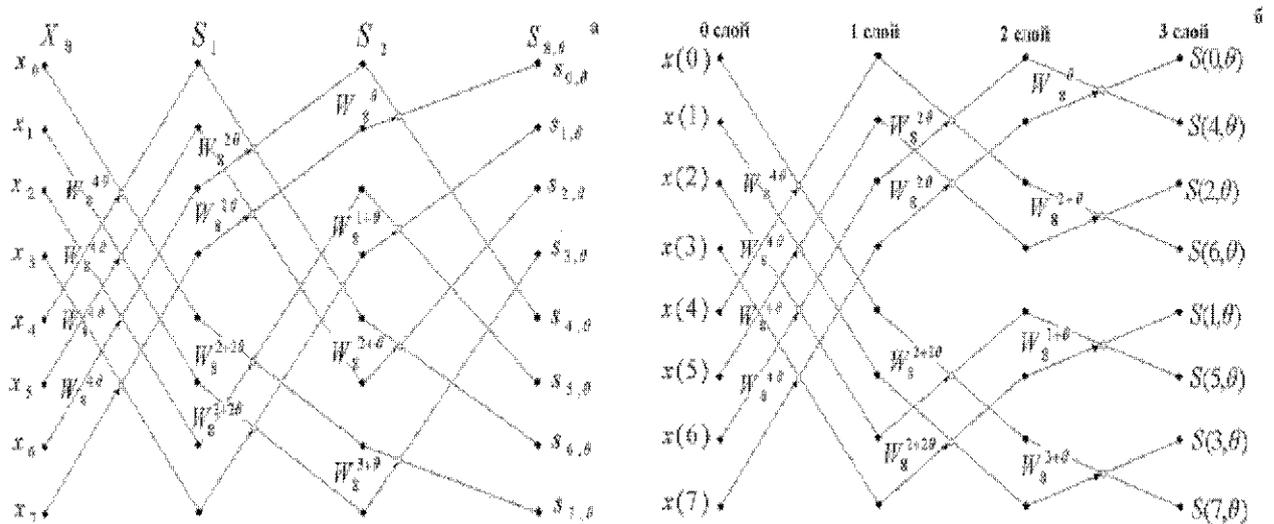


Рисунок 10 – Структура алгоритма получения гильбертова ИС методом ДПФ-П

В пятой главе предложены быстрые алгоритмы цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье. Предложены быстрые процедуры реализации следующих преобразований Фурье: быстрый алгоритм дискретного преобразования Фурье действительных ИС, быстрые алгоритмы параметрического дискретного преобразования Фурье комплексных и действительных ИС (БПФ-П), быстрый алгоритм параметрического дискретного преобразования Фурье сигналов большой длительности в реальном масштабе времени.

Для практического получения преимуществ обработки дискретных сложных, случайных и смешанных ИС в параметрических базисах Фурье, необходимо существование соответствующих быстрых алгоритмов. Действительно, поскольку реализация ДПФ-П, АДПФ, МДПФ-П требует выполнения N^2 комплексных умножений (например, с помощью процессорных измерительных средств (ПриС)), то уже при достаточно умеренных значениях N - интервала практическая реализация этих преобразований становится проблематичной.

В главе доказано, что быстрые алгоритмы реализации этих преобразований существуют, которые автор назвал (по аналогии с алгоритмом БПФ) **алгоритмами быстрого параметрического преобразования Фурье** (алгоритмы БПФ-П) (рисунок 11 а, б). Базис ДЭФ-П является мультипликативным, в отличие от базиса ДЭФ, не по двум переменным k и n , а по одной переменной (переменной n). Поэтому для ДПФ-П существует только класс алгоритмов БПФ-П **с прореживанием по времени**, а для ОДПФ-П только класс алгоритмов БПФ-П **– с прореживанием по частоте**, которые допускают множество модификаций (рисунок 11 а, б).



а – без замещения (естественный порядок на входе и выходе алгоритма); б – с замещением (in place) (естественный порядок на входе, двоично-инверсный – на выходе)

Рисунок 11 – Графы алгоритмов БПФ-П

Исследования, проведенные автором работы, выявили **два фундаментальных свойства** коэффициентов ДПФ-П действительных ИС. При значении параметра

$\theta = 1/2$ все коэффициенты ДПФ-П обладают **свойством комплексно-сопряженной симметрии**:

$$S_N(k, 1/2) = S_N^*((N-1-k), 1/2); k = \overline{0, N/2-1}, \quad (26)$$

а при значениях параметра $\theta \neq 0; 1/2$ коэффициенты ДПФ-П обладают важным свойством, которое автор назвал «**перекрестной комплексно-сопряженной симметрией**»:

$$S_N(k, \theta) = S_N^*(N-1-k, 1-\theta); \theta \neq 0, 1/2, k = \overline{0, N/2-1}; \quad (27)$$

$$S_N(k, 1-\theta) = S_N^*(N-1-k, \theta); \theta \neq 0, 1/2, k = \overline{0, N/2-1}. \quad (28)$$

На рисунке 12 для некоторой детерминированной действительной последовательности в $N=8$ отсчетов проиллюстрировано это фундаментальное свойство коэффициентов ДПФ-П.

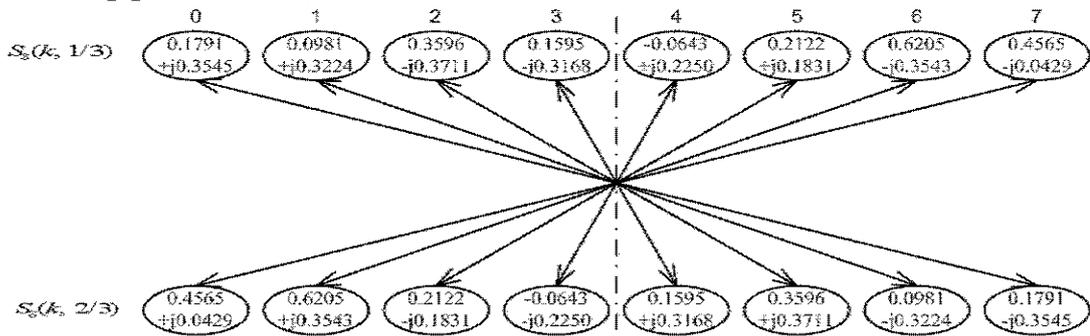
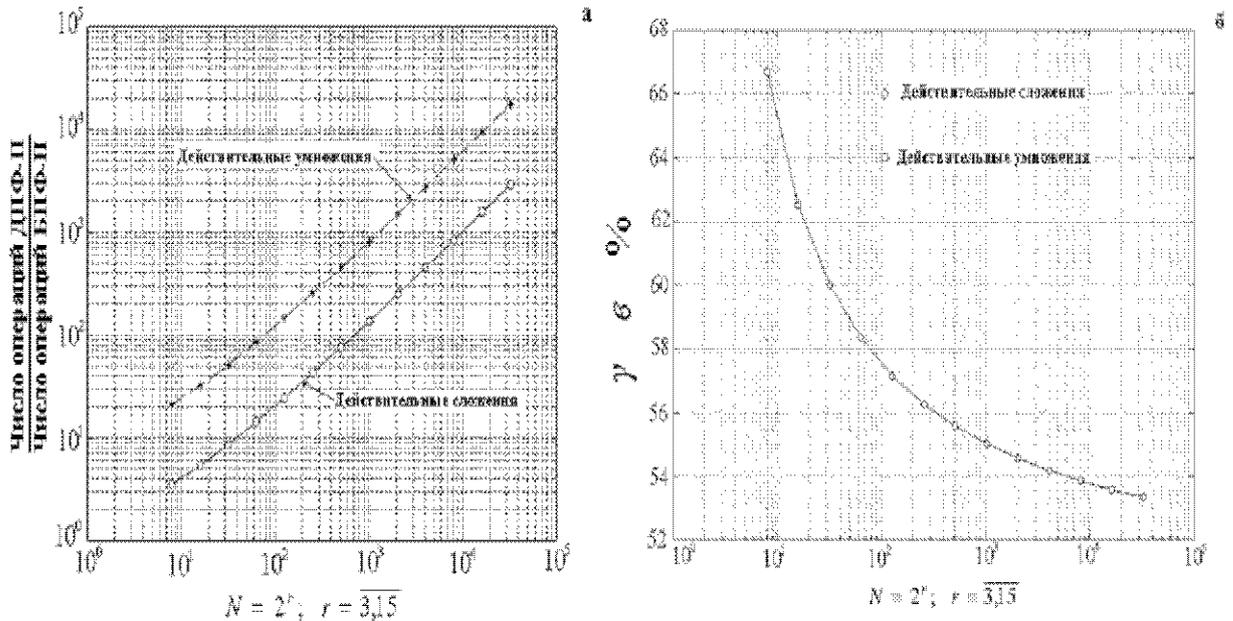


Рисунок 12 – Перекрестная комплексно-сопряженная симметрия коэффициентов ДПФ-П для действительных сигналов при значениях параметра $\theta \neq 0; 1/2$

Алгоритмы БПФ-П дают существенное сокращение числа операций, при реализации преобразования ДПФ-П (рисунок 13 а).



а – Сокращение числа операций в алгоритме БПФ-П по сравнению с ДПФ-П;
 б – Сокращение числа операций в действительном БПФ-П по сравнению с комплексным БПФ-П,

Рисунок 13 – Сокращение числа операций в алгоритме БПФ-П

Поскольку в прикладных задачах в большинстве случаев имеют дело с действительными ИС, у которых $\text{Im}\{x(n)\}=0$, $n=\overline{0, N-1}$, для такого вида дискретных ИС в главе разработаны и исследованы быстрые алгоритмы дискретных косвенных измерений в параметрических базисах Фурье при $\theta=1/2$ и $\theta \neq 1/2$. На рисунке 13, б приведен результат сравнения экономии числа операций при использовании комплексного БПФ-П (алгоритм А) и действительного БПФ-П (алгоритм В) согласно критерия: $\gamma=(N_1-N_2)/N_1$; где N_1 – число операций в алгоритме А, N_2 – число операций в алгоритме В.

В главе предложен новый метод и алгоритм БПФ-П действительных последовательностей большой длительности, который эффективен именно за счет метода, а не аппаратных решений. Создание данного метода стало возможным благодаря тому, что автором была разработана теория параметрического дискретного преобразования Фурье, включая быстрые алгоритмы его вычисления для действительных и комплексных последовательностей.

На основе анализа системы параметрических дискретных экспоненциальных функций предложена структура алгоритма получения параметрического спектра ИС в реальном масштабе времени методом ДПФ-П (рисунок 14).

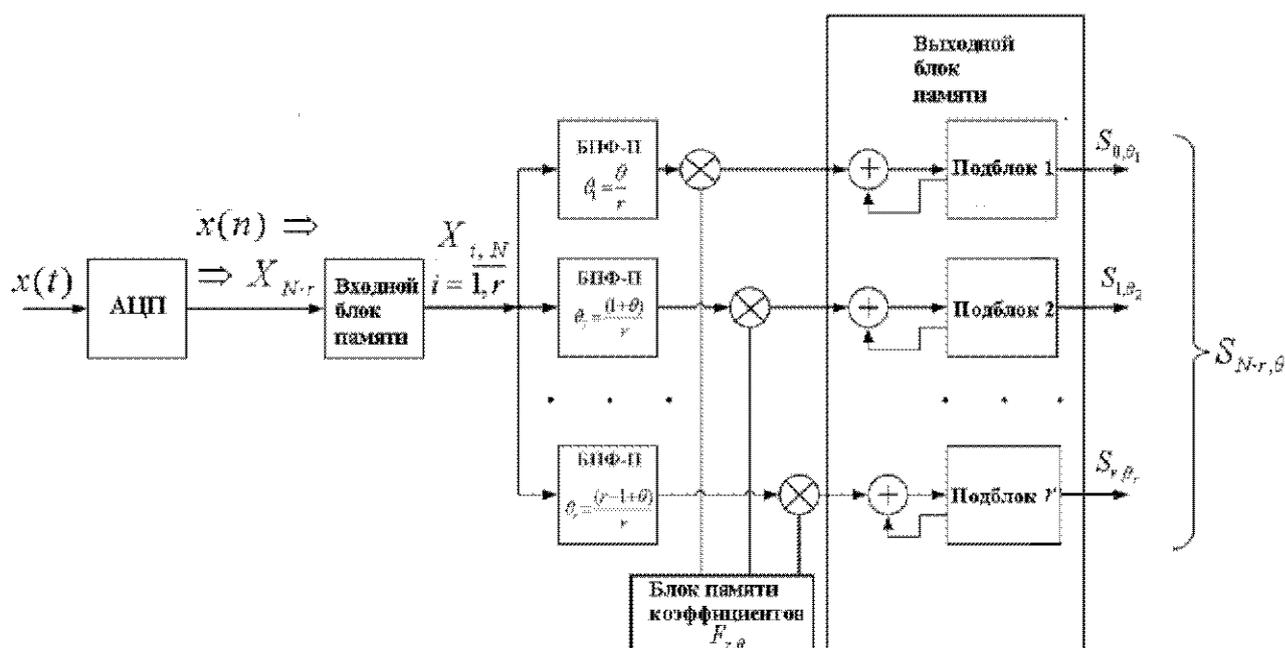


Рисунок 14 – Структура алгоритма получения параметрического спектра ИС в реальном масштабе времени

Предлагаемый метод позволяет обеспечить обработку цифровых ИС в реальном масштабе времени, а также существенно расширить диапазон длительностей исходных цифровых ИС, спектр которых может быть получен быстрыми алгоритмами.

В шестой главе рассмотрены приложения методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье. Приведены результаты апробации и внедрения систем ЦОИС для технических систем различной сложности. Изложена практика разработки виртуальных приборов (ВП) обработки дискретных ИС на конечных интервалах в

параметрических дискретных базисах Фурье в программно-инструментальной среде LabVIEW. Приведен сравнительный анализ методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье

В системном анализе сложную систему принято описывать с трех точек зрения: функциональной, морфологической и информационной. Основываясь на этой общей методологии и с учетом того, что согласно теории сложных систем уровни декомпозиции системы (границы систем различных уровней) должны совпадать с уровнями иерархии, иерархическую функциональную морфологически-информационную модель ЦОИС можно представить в виде следующих описаний.

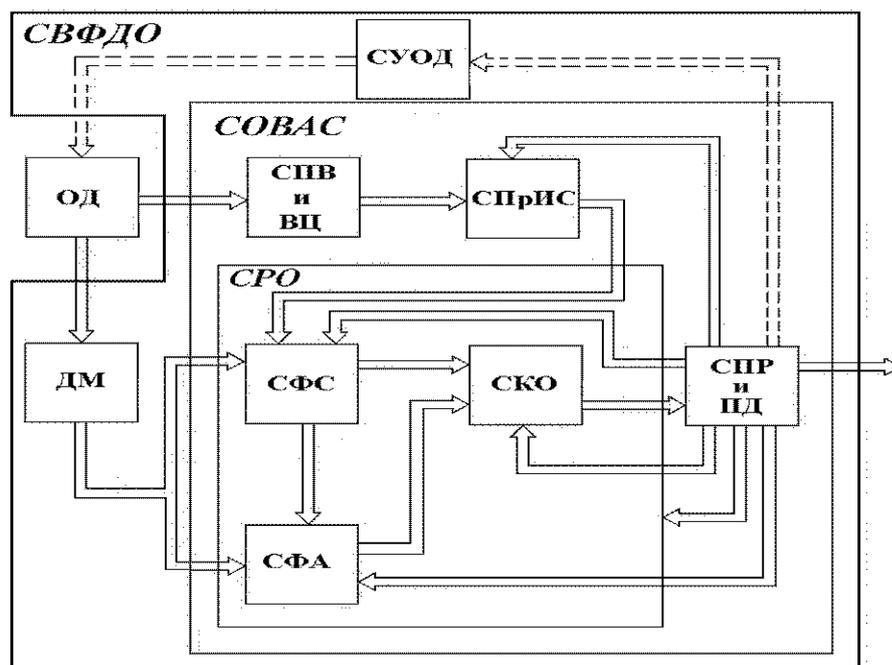
1. Функциональное описание S_Φ системы ЦОИС – тройка конечных множеств, отражающих функции Φ , операторы преобразования R и иерархию G системы ЦОИС:

$$S_\Phi = \{\Phi, R, G\}. \quad (29)$$

2. Морфологическо-информационное описание $S_{M,И}$ системы ЦОИС – пятерка конечных множеств, отражающих элементы (подсистемы, внутри которых морфологическо-информационное описание не распространяется) M и их свойства, связи V , структуры E , композицию K и организацию системы I ЦОИС:

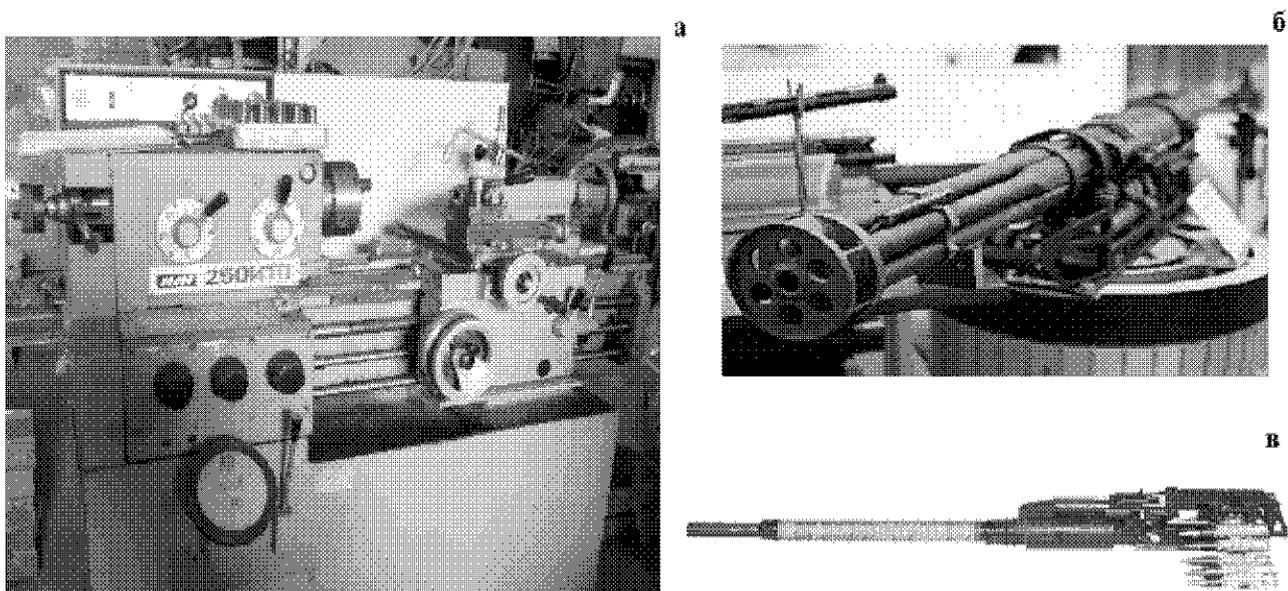
$$S_{M,И} = \{M, V, E, K, I\}. \quad (30)$$

На базе этих описаний автором разработана **иерархическая функциональная морфологическо-информационная модель системы ЦОИС** в составе суперсистемы виброакустического функционального диагностирования объектов (СВФДО), которая реализована в условиях производства. Обобщенная функционально-структурная схема СВФДО приведена на рисунке 15, а на рисунке 16 некоторые объекты, порождаемые ИС которых обрабатывались СОВАС.



ОД – объект диагностирования; ДМ – диагностическая модель; СОВАС – система обработки виброакустического сигнала; СУОД – система управления объектом диагностирования (может отсутствовать, поэтому связи показаны пунктиром). Подсистемами СОВАС являются: СПВиВЦ – система первичных вибропреобразователей и входных цепей; СПрИС – система процессорных измерительных средств измерения параметров виброакустического сигнала; СПриПД – система принятия решения и постановки диагноза; СРО – система распознавания образов, включающая в себя СФС (систему формирования словаря диагностических признаков), СФА (систему формирования алфавита классов (диагнозов)), СКО (систему классификации образов).

Рисунок 15 Обобщенная функционально-структурная схема системы виброакустического функционального диагностирования объектов (СВФДО)



а – токарно винторезный станок 250 ИТП, б – авиационная пушка 9А-768,
в – авиационная пушка 9А-4071 К.

Рисунок 16 – Объекты, порождаемые ИС которых обрабатывались СОВАС

На рисунке 17 в качестве примера приведена блок-диаграмма виртуального прибора измерения и обработки стандартной и модифицированной огибающих дискретного ИС, а на рисунке 18 соответствующий ей ВП.

ВП имеет 2 монитора, на которые осуществляется вывод исходного сигнала и вывод на один график стандартной и модифицированной огибающих. Предусмотрено измерение амплитуд отсчетов входного сигнала, стандартной огибающей и модифицированной огибающей. В виртуальном приборе измерения стандартной и модифицированной огибающих быстрое параметрическое преобразование Фурье, модифицированное параметрическое преобразование Фурье реализовано в виде виртуальных подприборов (на блок-диаграмме – подприборы ДПФ-П и МДПФ-П).

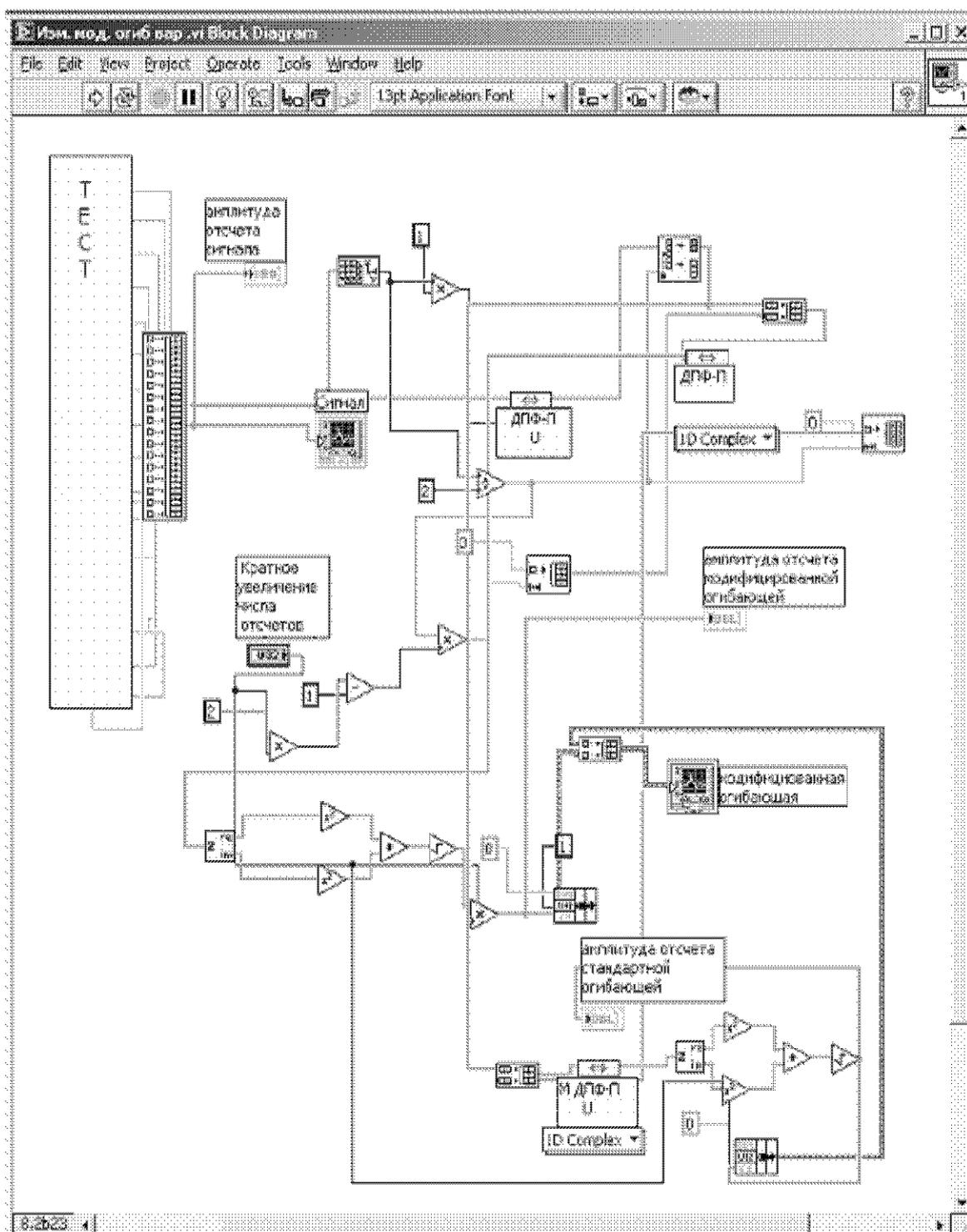
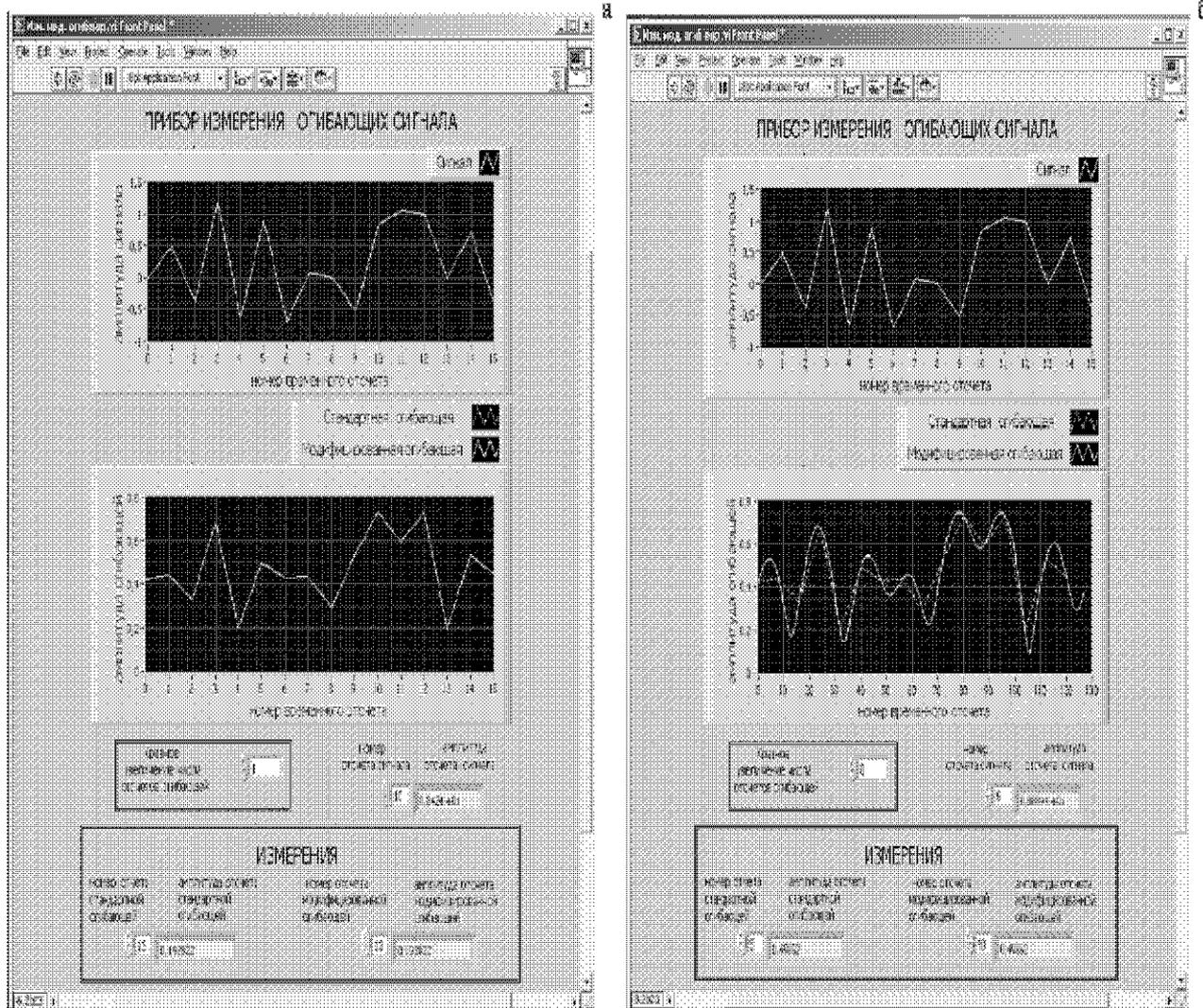


Рисунок 17 – Блок-диаграмма виртуального прибора измерения и обработки огибающей ИС на базе дискретного преобразования Гильберта (стандартная огибающая) и обобщенного дискретного преобразования Гильберта (модифицированная огибающая)

На рисунке 18 а и рисунке 18 б проиллюстрировано изменение модифицированной огибающей: а – без увеличения числа отсчетов модифицированной огибающей (стандартная огибающая); б – увеличение числа отсчетов модифицированной огибающей в восемь раз.



а – без увеличения числа отсчетов огибающей ИС;

б – при увеличении числа отсчетов огибающей ИС в 8 раз

Рисунок 18 – Виртуальный прибор измерения и обработки мгновенной амплитуды сигнала на базе дискретного преобразования Гильберта (стандартная огибающая) и обобщенного дискретного преобразования Гильберта (модифицированная огибающая)

В главе также приведены результаты внедрения средств цифровой обработки информационных сигналов, порождаемых в технических системах различной сложности: в информационно-управляющей системе комплексной безопасности ОАО «Чепецкий механический завод», двигателями внутреннего сгорания, новой гаммой станков 250 ИТП, 250 ИТВ, 250 ИТВФ 1, авиационными пушками 9А-4071К, 9А-768.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы.

В приложениях представлены материалы, поясняющие специфику цифровой обработки информационных сигналов, приведены частотные модели виброакустических сигналов различных элементов механических систем и акты внедрения научных и практических результатов диссертационного исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАУЧНЫЕ ВЫВОДЫ

Основными результатами диссертационной работы является развитие теории цифровой обработки информационных сигналов, разработка новых и совершенствование существующих методов и алгоритмов цифровой обработки информационных сигналов в параметрических базисах Фурье, обладающих функциональными возможностями по подавлению эффектов наложения, частотокола, утечки и гребешкового эффекта во временной, частотной и корреляционной областях и обеспечивающих выполнение современных требований к эффективности, надежности и качеству создаваемых изделий и технических систем различного назначения.

В диссертационной работе решены следующие основные задачи:

- выявлены научные и технические проблемы современной цифровой спектральной обработки сложных и смешанных информационных сигналов методами и алгоритмами на основе дискретного преобразования Фурье;
- осуществлено развитие теории, разработаны методы и алгоритмы цифровой спектральной обработки сложных и смешанных информационных сигналов во временной, корреляционной, частотной и частотно-временной областях на конечных интервалах в параметрических дискретных базисах Фурье;
- проведено развитие теории, разработаны методы и алгоритмы цифровой обработки мгновенных параметров смешанных информационных сигналов на конечных интервалах на основе параметрических дискретных преобразований Фурье;
- разработаны быстрые процедуры спектральной обработки информационных сигналов на основе параметрических дискретных преобразований Фурье;
- поставлены и решены задачи практической реализации разработанных методов и алгоритмов цифровой спектральной обработки ИС в параметрических дискретных базисах Фурье.

В рамках решения указанных выше задач получены следующие основные результаты, позволившие обеспечить выполнение повышенных требований к эффективности, надежности и качеству создаваемых изделий и технических систем различного назначения.

1. Разработаны преобразования для обработки информационных сигналов в частотной и частотно-временной областях:

- параметрическое дискретное преобразование Фурье;
- аперидическое дискретное преобразование Фурье;
- скользящее параметрическое дискретное преобразование Фурье.

Данные преобразования позволяют, в отличие от обработки ИС в классических дискретных базисах Фурье, проводить обработку ИС в частотной и частотно-временной областях не на фиксированных множествах частот, а на множестве частот, мощность которых регулируется параметрами соответствующих преобразований.

2. Разработана новая форма преобразование Фурье – дискретно-частотное преобразование Фурье, которая позволяет поставить в соответствие во временной области дискретному сигналу непрерывный сигнал, решая проблему негативного влияния на результаты измерения эффекта частотола во временной области.
3. Разработано преобразование для обработки информационных сигналов во временной области:
 - модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье, позволяющее, в отличие от обработки ИС в классических дискретных базисах Фурье, проводить обработку ИС во временной области не на фиксированном множестве моментов времени, а на множестве моментов времени, мощность которого регулируется параметром преобразования.
4. Разработаны модификации и обобщения дискретного преобразования Гильберта:
 - модифицированное дискретное преобразование Гильберта;
 - обобщенное дискретное преобразование Гильберта;
 - модифицированное обобщенное дискретное преобразование Гильберта.

Отличием разработанных обобщений дискретного преобразования Гильберта от стандартного дискретного преобразования Гильберта является учет свойства локальности данного преобразования, что позволило повысить точность измерения огибающих сложных ИС сигналов минимум на порядок.
5. Предложены методы цифровой блочной обработки с накоплением, на основе которых проведено обобщение метода Герцеля. Разработанные методы позволили проводить цифровую обработку ИС как на целых, так и дробных частотах, обеспечив при этом высокую частотную разрешающую способность и устойчивость цифровой обработки ИС.
6. Проведено обобщение структуры гребенчатого фильтра. В математической основе обобщенного гребенчатого фильтра лежит поворот нулей амплитудно-частотной характеристики гребенчатого фильтра, что позволило сократить время цифровой обработки ИС, решить проблему погрешностей коэффициентов фильтров на основе частотной выборки, не теряя при этом одного из важнейших достоинств данного вида фильтров – возможности рекуррентного получения результатов фильтрации.
7. Открытый автором эффект инвариантности энергетического спектра действительных гармонических сигналов в классическом и параметрических базисах Фурье дает возможность оценить потенциальную точность обработки сложных и смешанных ИС в классическом и параметрических дискретных базисах Фурье.
8. Осуществлено развитие теории цифровой обработки сложных ИС во временной, частотной и частотно-временной областях, а также смешанных ИС в корреляционной, спектральной и спектрально-временной областях на конечных интервалах. Разработанные теоретические основы цифровой

обработки сложных и смешанных ИС в параметрических дискретных базисах Фурье являются базой создания новых и совершенствовании существующих методов, алгоритмов и средств повышения эффективности, надежности и качества технических систем в различных областях науки и техники.

9. Созданы быстрые алгоритмы обработки ИС на конечных интервалах в параметрических дискретных базисах Фурье. Предложенные алгоритмы позволили более чем на порядок сократить время цифровой обработки ИС и обеспечить ее реализацию в реальном масштабе времени.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ОСНОВНЫХ РАБОТАХ АВТОРА

Монография

1. Пономарева О.В. Основы теории дискретных косвенных измерений параметров сигналов / Пономарева О.В. – Ижевск: Издательство ИжГТУ, – 2016. 172с.

В журналах, входящих в Перечень ВАК РФ

1. Пономарева, О.В. Виброакустическое диагностирование коробок передач станков цифровыми методами / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Станки и инструмент. – 1983. – № 9. – С. 18 - 21.
2. Пономарева, О.В. Временные окна при оценке энергетических спектров методом параметрического дискретного преобразования Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Автометрия. – 1983. – № 4. – С. 39 - 45.
3. Пономарева, О.В. Модификация дискретного преобразования Фурье для решения задач интерполяции и свертки функций / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 29. – № 8. – С. 1561 - 1570.
4. Пономарева, О.В. Вероятностные свойства спектральных оценок, полученных методом параметрического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 36 - 41.
5. Пономарева, О.В. Развитие теории спектрального анализа дискретных сигналов на конечных интервалах в базисе параметрических экспоненциальных функций / О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – № 2. – С. 7 - 11.
6. Пономарева, О.В. Методология определения погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов, реализуемых процессорными измерительными средствами / В.А. Алексеев, В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 91 - 99.
7. Пономарева, О.В. Теория и применение параметрического дискретного преобразования Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2011. – № 1. – С. 2 - 6.

8. Пономарева, О.В. Быстрое параметрическое дискретное преобразование Фурье действительных последовательностей / О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 2. – С. 2 - 5.
9. Пономарева, О.В. Модификация фильтра на основе частотной выборки для решения задач цифровой обработки случайных процессов со скрытыми периодичностями / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 2(20). – С. 122 – 129.
10. Пономарева, О.В. Скользящее параметрическое ДПФ в задачах обнаружения тональных компонент / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 4. – С. 2 - 7.
11. Пономарева, О.В. Обобщение алгоритма Герцеля для решения задач выявления скрытых периодичностей / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, В.А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 41 - 46.
12. Пономарева, О.В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Фурье действительных последовательностей / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 2. – С. 10 - 15.
13. Пономарева, О.В. Цифровой периодограммализ и проблемы его практического применения / О.В. Пономарева, В.А. Алексеев, А.В. Пономарев // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова. – 2013. – № 2(58). – С. 130 - 133.
14. Пономарева, О.В. Измерение текущего энергетического фурье-спектра комплексных и действительных сигналов на конечных интервалах / О.В. Пономарева, В.А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2(22). – С. 149 - 157.
15. Пономарева, О.В. Иерархическая морфологическо-информационная модель системы функционального диагностирования объектов на основе цифровой обработки сигналов / О.В. Пономарева, В.А. Пономарев, А.В. Пономарев // Датчики и системы. – 2014. – № 1(176). – С. 2 - 8.
16. Пономарева, О.В. Обобщение алгоритмов Герцеля и скользящего параметрического дискретного преобразования Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 1. – С. 3 - 11.
17. Пономарева, О.В. Инвариантность текущего энергетического спектра Фурье комплексных дискретных сигналов на конечных интервалах / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2014. – Вып. 2. – С. 8 - 16.
18. Пономарева, О.В. Метод эффективного измерения скользящего параметрического спектра Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Автометрия. – 2014. – Т. 50. – № 2. – С. 31 - 38.
19. Пономарева, О.В. Инвариантность скользящего энергетического спектра Фурье дискретных сигналов в базисной системе параметрических экспоненциальных функций / О.В. Пономарева // Вестник Ижевского

- государственного технического университета имени М.Т.Калашникова. – 2014. – № 2(62). – С. 102 - 106.
20. Пономарева, О.В. Измерение спектров комплексных сигналов на конечных интервалах методом апериодического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 1(23). – С. 100 - 107.
 21. Пономарева, О.В. Быстрый алгоритм измерения спектра действительных сигналов методом апериодического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева, В.А. Алексеев, А.В. Пономарев // Вестник Ижевского государственного технического университета имени М.Т.Калашникова. – 2014. – № 2(62). – С. 106 - 109.
 22. Пономарева, О.В. Неинвариантность скользящего энергетического параметрического фурье-спектра действительных тональных сигналов / О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов. – 2014. – № 2. – С. 7 - 14.
 23. Пономарева, О.В. Измерение временных спектров дискретных сигналов методом модифицированного параметрического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 132 - 138.
 24. Пономарева О.В. Измерение скользящего взвешенного энергетического дискретно-временного спектра тональных компонент / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, В.А. Пономарев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2 (24). – С. 126 - 132.
 25. Пономарева О.В., Пономарев А.В. Восстановление значений непрерывных частотных спектров дискретных сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье / О.В.Пономарева, А.В.Пономарев // Вестник Ижевского Государственного Технического Университета. 2015.- №3.(67). -С. 88-91.
 26. Пономарева, О.В. Измерение временных спектров дискретных сигналов на конечных интервалах / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Вестник Ижевского Государственного Технического Университета им. М.Т. Калашникова. 2016.- №2.(70). -С. 80-83.
 27. Пономарева, О.В. Применение временных окон в векторном анализе дискретных сигналов / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева, В.Ю. Пономарева // Интеллектуальные системы в производстве. – 2016. – № 2 (29). – С. 19 - 21.

3. В других научных изданиях

28. Пономарева, О.В. Обобщение дискретного преобразования Фурье для интерполяции во временной области / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1983. – Т. 16. – № 9. – С. 67 - 68.
29. Пономарева, О.В. Цифровая обработка речевых сигналов в параметрическом базисе Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Автоматическое распознавание слуховых образов (АРСО-12), 1982.- Киев. С.126-128.
30. Пономарева, О.В. Распараллеливание алгоритма БПФ в задачах обработки последовательностей, дополненных нулевыми элементами. Параллельный

- метод получения коэффициентов дискретного преобразования Фурье / В.А.Пономарев, О.В.Пономарева // Тез. докл. Всесоюзн. школы-семинара «Распараллеливание обработки информации (РОИ-83), 1983. Львов. С.190-192.
31. Пономарева, О.В. Микропроцессорная система обработки акустических сигналов механических систем на основе ДПФ-П / О.В.Пономарева, А.И.Бабушкин // Тез. докл. Всесоюзн. конф. По информационной акустике .1986. Москва /АКИН. С.26-27.
 32. Пономарева, О.В. Метод анализа вибрационных сигналов во временной области / О.В.Пономарева, Г.А.Тихонов // Материалы Всесоюзн. семинара «Новые методы вибродиагностики технического состояния машин». 1986. Каунас. С. 61-63.
 33. Пономарева, О.В. Параллельный метод получения коэффициентов дискретного преобразования Фурье / В.А.Пономарев, О.В.Пономарева // Тез. докл. Всесоюзн. школы-семинара «Распараллеливание обработки информации (РОИ-87), 1987. Львов. С.51-52.
 34. Пономарева, О.В. Непараметрические методы анализа и обработки виброакустических сигналов в спектрально-временной области /О.В.Пономарева // Доклады Всесоюзн. НТК « Методы и средства виброакустической диагностики машин», 1988. Ивано-Франковск. С.178-179.
 35. Пономарева, О.В. Алгоритмы цифровой обработки сигналов в экспертных системах вибрационно-акустической диагностики / В.А.Пономарев, О.В.Пономарева, Г.Н.Шрайбер // Доклады IV Всесоюзной конф. «Математические методы распознавания образов (ММРО-IV),1989. Рига. С. 34-37.
 36. Пономарева, О.В. Измерение спектральных функций дискретных случайных сигналов на конечных интервалах процессорными измерительными средствами /О.В.Пономарева // Труды научно-технической конференции «Радио и волоконно-оптическая связь, локация и навигация, т.1, 22-24 апр. 1997.-Воронеж .-1997 .-С.305-310.
 37. Пономарева, О.В. Неразрушающий контроль коробок передач станков по виброакустическому сигналу цифровыми методами / О.В.Пономарева // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: тр. 4-й междунар. науч. конф., 9-11 дек.,2008. Тюмень / ТюмГНГУ. 2008. – С.143-145.
 38. Пономарева, О.В. Проблемы создания методов и средств виброакустического функционального диагностирования, ориентированных на применение в условиях производства диагностируемых объектов и обладающих широким спектром функциональных возможностей / О.В. Пономарева // Физические основы диагностики материалов и изделий, и приборов для её реализации: тр. Всеросс. науч. конф., 12-13 нояб., 2010. Тюмень / ТюмГНГУ. 2010. – С. 26 - 30.
 39. Пономарева, О.В. Оценка энергетических спектров виброакустических сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье /

- О.В. Пономарева // Физические основы диагностики материалов и изделий, и приборов для её реализации: тр. всеросс. науч. конф., 12-13 нояб., 2010. Тюмень / Тюм. ГНГУ. 2010. – С. 21 - 26.
40. Пономарева, О.В. Основы теории спектрального анализа дискретных сигналов в информационно-измерительных системах виброакустического диагностирования / О.В. Пономарева // Приборостроение-2010: тр. 3-й междунар. науч. конф., 10-12 нояб., 2010. Минск / БНТУ. 2010. – С. 225 - 226.
41. Пономарева, О.В. Быстрые алгоритмы параметрического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева // Приборостроение-2010: тр. 3-й междунар. науч. конф., 10-12 нояб., 2010. Минск / БНТУ. 2010. – С. 223 - 224.
42. Ponomareva, Olga. Theoretical basis of the spectral analysis of discrete signals at finite intervals / Olga Ponomareva // Proc. of the 9th international conference “Research, development and application of high technologies in the industry”, 22-23 April 2010, St.-Petersburg. – Vol. 1. – St.-Petersburg, 2010. – P. 401 - 403.
43. Ponomareva, Olga. Statistical stability of power spectrum of casual signals in the basis of parametrical exponential functions / Olga Ponomareva // Proc. of the 9th international conference “Research, development and application of high technologies in the industry”, 22-23 April 2010, St.-Petersburg. – Vol. 1. – St.-Petersburg, 2010. – P. 200 - 204.
44. Ponomareva, Olga. Fundamentals of the theory of spectral analysis of discrete signals on finite intervals / Olga Ponomareva // Proc. of the 11th international conference “Modern information and electronic technologies” (MIET’2010), Odessa, Ukraine, 24-28 May, 2010. – Vol. 1. – Odessa, 2010. – P. 201.
45. Пономарева, О.В. Развитие теории спектрального анализа дискретных сигналов на конечных интервалах / О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA’2010): тр. 12-й междунар. науч. конф., март, 2010, Москва, Россия. – В т. 1. – 2010. – С. 38 - 41.
46. Ponomareva, Olga. One-bin sliding parametric discrete Fourier transform in the problems of detection and measurement of tonal components / Olga Ponomareva // Proc. of the 12th international conference “Modern information and electronic technologies” (MIET’2011), Odessa, Ukraine, 23-27 May, 2011. – Vol. 1. – Odessa, 2011. – P. 184.
47. Пономарева, О.В. Однобиновое параметрическое ДПФ в задачах обнаружения и измерения параметров тональных компонент / О.В.Пономарева // Труды научной конференции «Сессия научного совета по акустике РАН и XXIV сессия Российского акустического общества», 12-15 сент., 2011, Саратов / СГУ. 2011.-С. 62-65.
48. Пономарева, О.В. Теория спектрального анализа дискретных сигналов на конечных интервалах в базисе параметрических дискретных экспоненциальных функций /О.В.Пономарева// Труды научной конференции «Сессия научного совета по акустике РАН и XXIV сессия Российского акустического общества», 12-15 сент., 2011, Саратов / СГУ. 2011.-С.51-54.

49. Пономарева, О.В. Обобщение частотных диагностических моделей для решения задач виброакустического функционального диагностирования объектов / О.В. Пономарева // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы: тр. 2-й междунар. науч. конф., 11-13 апр., 2011. Курск / ЮЗГУ. 2011. – С. 121 – 124.
50. Пономарева, О.В. Системный анализ проблем создания систем виброакустического функционального диагностирования объектов / О.В. Пономарева // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы: тр. 2-й междунар. науч. конф., 11-13 апр., 2011. Курск / ЮЗГУ. 2011. – С. 117 - 120.
51. Пономарева, О.В. Аналитические свойства параметрического ДПФ / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2011): тр. 13-й междунар. науч. конф., март, 2011, Москва, Россия. – В т. 1. – 2011. – С. 60 - 63.
52. Пономарева, О.В. Скользящее параметрическое ДПФ в задачах виброакустического диагностирования объектов / О.В. Пономарева // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: тр. 4-й междунар. науч.-техн. конф., 26-27 сент., 20012. Могилев / БРУ. 2012. – С. 188 - 189.
53. Пономарева, О.В. Применение методов цифрового спектрального анализа в задачах электроэнцефалографии / О.В. Пономарева, А.Н. Зямбахтина, М.Н. Пудова // Приборостроение в 21 веке – 2012. Интеграция науки, образования и производства: тр. 8-й всеросс. науч. конф., 14-16 нояб., 2012. Ижевск / ИжГТУ. 2012. – С. 119 - 122.
54. Пономарева, О.В. Применение вейвлет-анализа и Фурье-анализа в задачах локализации периодических компонент / О.В. Пономарева // Приборостроение в 21 веке – 2012. Интеграция науки, образования и производства: тр. 8-й всеросс. науч. конф., 14-16 нояб., 2012. Ижевск / ИжГТУ. 2012. – С. 117 - 119.
55. Ponomareva, Olga. Parametric Fast Fourier transform of the real sequences when the parameter $\Theta = \frac{1}{2}$ / Olga Ponomareva // Proc. of the 13th international conference “Modern information and electronic technologies” (MIET'2012), Odessa, Ukraine, 4-8 June, 2012. – Vol. 1. – Odessa, 2012. – P. 167.
56. Пономарева, О.В. Быстрое параметрическое преобразование Фурье действительных последовательностей / О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2012): тр. 14-й междунар. науч. конф., март, 2012, Москва, Россия. – В т. 1. – 2012. – С. 104 - 108.
57. Пономарева, О.В. Скользящее параметрическое дискретное преобразование Фурье в задачах обнаружения тональных компонент / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2012): тр. 14-й междунар. науч. конф., март, 2012, Москва, Россия. – В т. 1. – 2012. – С. 7 - 10.
58. Пономарева, О.В. Иерархическое морфологическо-информационное описание систем функционального диагностирования объектов / О.В. Пономарева, А.В. Пономарев, Н.В. Пономарева // Современные

- информационные и электронные технологии. – 2013. – Т. 1. – № 14. – С. 121 - 124.
59. Пономарева, О.В. Модификация фильтра на основе частотной выборки путем обобщения разностного уравнения нерекурсивного гребенчатого фильтра / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Современные информационные и электронные технологии. – 2013. – Т. 1. – № 14. – С. 244 - 247.
60. Пономарева, О.В. Аксиомы измерения дискретных стационарных случайных сигналов на конечных интервалах / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2013): тр. 15-й междунар. науч. конф., март, 2013, Москва, Россия. – В т. 1. – 2013. – С. 70 - 74.
61. Пономарева, О.В. Цифровая обработка сигналов методом параметрического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева, А.Д. Демин // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: тр. 14-й междунар. науч. конф., 14 марта, 2014. Новочеркасск / ЮРГПУ. 2014. – С. 30 - 33.
62. Пономарева, О.В. Метод спектрального выявления скрытых периодичностей на основе дискретного преобразования Фурье и цифровой блочной обработки с накоплением / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2014): тр. 16-й междунар. науч. конф., март, 2014, Москва, Россия. – В т. 1. – 2014. – С. 172 - 176.
63. Пономарева, О.В. Метод выявления скрытых периодичностей в виброакустических сигналах на основе параметрического дискретного преобразования Фурье / О.В. Пономарева // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: тр. 5-й междунар. науч.-техн. конф., 24-25 сент., 2014. Могилев / БРУ. 2014. – С. 258-260 .
64. Пономарева, О.В. Методы дискретных измерений временных спектров детерминированных сигналов на конечных интервалах в дискретном базисе Фурье / О.В. Пономарева // Приборостроение-2014: тр. 7-й междунар. науч. конф., 19-21 нояб., 2014. Минск / БНТУ. 2014. – С. 122-123.
65. Пономарева, О.В. Современные методы дискретных измерений частотных спектров детерминированных сигналов на конечных интервалах в дискретном базисе Фурье / О.В. Пономарева, В.А. Алексеев, Н.В. Пономарева // Приборостроение-2014: тр. 7-й междунар. науч. конф., 19-21 нояб., 2014. Минск / БНТУ. 2014. – С. 124-125.
66. Пономарева, О.В. Метод быстрого вычисления дискретного преобразования Гильберта в частотной области / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Современные информационные и электронные технологии. – 2014. – Т. 1. – № 15. – С. 183 - 184.
67. Пономарева, О.В. Методы и алгоритмы спектрально-корреляционной компьютерной обработки электроэнцефалограмм / О.В. Пономарева, Е.Ф. Тюрикова // Современные информационные и электронные технологии. – 2014. – Т. 1. – № 15. – С. 70 - 71.

68. Пономарева, О.В. Метод цифровой блочной обработки с накоплением и его приложения в спектральном анализе сигналов со скрытыми периодичностями / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2014): тр. 16-й междунар. науч. конф., март, 2014, Москва, Россия. – В т. 1. – 2014. – С. 168 – 172.
69. Пономарева, О.В. Косвенные методы измерения спектров в дискретном базисе Фурье/ А.В. Пономарев // Приборостроение-2015: тр. 8-й междунар. науч. конф., 19-21 нояб., 2015. Минск / БНТУ. 2015. – С. 162-166.
70. Пономарева, О.В. Классификация дискретных полигармонических сигналов и измерение частот их гармоник на конечных интервалах сигналов / Н.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Приборостроение-2015: тр. 8-й междунар. науч. конф., 19-21 нояб., 2015. Минск / БНТУ. 2015. – С. 118-124.
71. Пономарева, О.В. Модифицированное параметрическое дискретное преобразование Фурье / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2015): тр. 17-й междунар. науч. конф., март, 2015, Москва, Россия. – В т. 1. – 2015. – С. 196 – 200.
72. Пономарева, О.В. Процессорные средства виброакустического диагностирования механообрабатывающего оборудования / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева // Приборостроение в XXI веке – 2015. Интеграция науки, образования и производства: сб. материалов XI Международной научно-технической конференции (Ижевск, 25–27 ноября 2015 г.). – Ижевск: Изд-во ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2016. (Электронное издание). – С. 221 – 227.
73. Пономарева, О.В. Дискретно-частотное преобразование Фурье и его приложения / В.А. Пономарев, О.В. Пономарева, А.В. Пономарев // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2016): тр. 18-й междунар. науч. конф., март, 2016, Москва, Россия. – В т. 1. – 2016. – С. 120 – 124.
74. Пономарева, О.В. Дискретные трапецеидальные временные оконные функции для гармонического анализа сложных сигналов / О.В. Пономарева, Н.В. Пономарева, В.Ю. Пономарева // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA'2016): тр. 18-й междунар. науч. конф., март, 2016, Москва, Россия. – В т. 1. – 2016. – С. 275 – 285.