

**На правах рукописи**



Машков Андрей Валерьевич

**Алгоритмическое и программное обеспечение информационно-измерительных систем спектрального анализа на основе бинарно-знакового аналого-стохастического квантования сигналов**

**2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Самара, 2024

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель:

**Якимов Владимир Николаевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматизация и управление технологическими процессами» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Официальные оппоненты:

**Дворкович Александр Викторович**

доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой мультимедийных технологий и телекоммуникаций, ФГАОУ ВО «Московского физико-технического института (национальный исследовательский университет)»

**Пономарева Ольга Владимировна**

доктор технических наук, профессор кафедры «Приборы и методы измерений, контроля, диагностики», ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Защита состоится 10 июня 2024 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.04, созданном при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443001, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д.244, аудитория 200.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443001, г. Самара, ул. Первомайская, д.18 и на сайте диссертационного совета по адресу:

Автореферат разослан «            »            2024 г.

Отзывы и замечания по автореферату просим высылать в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: 443001, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д.244, Самарский государственный технический университет, главный корпус, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.04: тел. (846) 278-44-96, e-mail: D24.2.377.04@yandex.ru.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.377.04

кандидат технических наук, доцент



Е.Е. Ярославкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Решение широкого круга прикладных задач неразрывно связано со спектральным анализом (СА) сложных многокомпонентных сигналов. В процессе СА таких сигналов используют методы, связанные с оценкой их спектральной плотности мощности (СПМ). Одними из основных методов оценивания СПМ являются классические периодограммный и коррелограммный методы, в основе которых лежит преобразование Фурье.

В настоящее время в информационно-измерительных системах (ИИС) анализ сигналов преимущественно осуществляется в цифровом виде. В результате при вычислении периодограммных и коррелограммных оценок СПМ осуществляется дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Это приводит к тому, что при выполнении цифровых алгоритмов вычисления этих оценок выполняется существенное число операций умножения. При этом если используются весовые оконные функции, то число операций умножения увеличивается. Кроме того, в случае коррелограммного метода предварительно вычисляются оценки КФ, что также связано с выполнением операций умножения. Все это увеличивает мультипликативную сложность цифровых алгоритмов вычисления оценок СПМ.

Таким образом, актуальной является задача разработки математического и алгоритмического обеспечения, приводящего к снижению мультипликативной сложности цифровых процедур вычисления оценок СПМ, и реализация на их основе метрологически значимого программного обеспечения (ПО) ИИС для СА. Это должно обеспечить экономию вычислительных ресурсов и принятие обоснованных решений на основе полученных результатов СА в условиях ограниченного времени обработки сигналов.

### **Степень разработанности темы исследования**

Развитие цифровых технологий обуславливает повышенный интерес к разработке новых методов цифрового СА. Однако, как правило, предполагается обработка дискретных последовательностей сигналов, полученных на основе равномерной дискретизации и многоуровневого квантования, и недооценивается влияние аналого-цифрового преобразования на эффективность последующих вычислительных процедур. Вместе с тем, авторы А.Н. Денисенко, Э.И. Цветков, Ю.Н. Горбунов, Г.В. Куликов, Г.П. Веселова, Ю.И. Грибанов, С.А. Прохоров обосновывают аналого-цифровое преобразование как первичное преобразование, которое может обеспечить предварительную обработку сигналов с последующим упрощением и повышением производительности вычислительных процедур. Это открывает возможность разработки экономичного в вычислительном отношении математического и алгоритмического обеспечения оценивания СПМ и создания на его основе метрологически значимого ПО ИИС для СА сложных сигналов.

К перспективным направлениям разработки методов аналого-цифрового преобразования относится аналого-стохастическое преобразование, основанное на рандомизации первичного преобразования сигналов в цифровую форму. Одним из факторов, предопределивших разработку такого преобразования стал метод статистических испытаний или метод Монте-Карло. В частности, в своих работах авторы G. Rubino, B. Tuffin, P. D. Kroese, T. Taimre, Z. I. Botev, C. P. Robert, G. Casella рассматривают применение метода Монте-Карло в контексте статисти-

ческих испытаний при анализе вероятностных характеристик. Адаптация метода Монте-Карло к обработке сигналов привела к построению моделей грубого стохастического квантования. Результатом такого формирования данных является упрощение их обработки. Однако имеется и существенный недостаток. Это медленная сходимость результатов вычисления статистических оценок.

Развитие теории аналого-стохастического преобразования связано с разработкой методов функционального стохастического квантования сигналов. Особое внимание этим методов уделено в работах И.Я. Билинского, А.К. Микелсона, А.Ж. Виксны, М.А. Элтса. В процессе такого квантования могут формироваться непосредственно оценки моментных функций. При этом для вычисления оценки каждой из таких функций требуется генерировать специальную рандомизирующую функцию. Однако генерирование такой функции может быть сопряжено с трудностями воспроизведения ее характерных особенностей, необходимых для вычисления оценки конкретной вероятностной характеристики сигнала.

Особое значение для теории стохастического квантования имеют работы Г.Я. Мирского, J. Max, A.V. Oppenheim. Авторы этих работ детально исследуют бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование с использованием в качестве рандомизирующего сигнала равномерно распределенного случайного сигнала, выполняющего функцию стохастического порога квантования. Показано, что разработанные на его основе алгоритмы должны обеспечивать высокую сходимость вычисления статистических оценок. Однако переход к цифровым вычислительным процедурам также осуществляется на основе представления результата такого квантования во времени в виде дискретных выборок с постоянным интервалом дискретизации. Это приводит к простой замене операций интегрирования операциями суммирования, что не позволяет в полной мере использовать возможности бинарно-знакового аналого-стохастического квантования для снижения вычислительной сложности разрабатываемых алгоритмов.

В работах Якимова В.Н. на основе теории дискретно-событийного моделирования бинарно-знаковое аналого-стохастическое квантование рассматривается как формализованное описание формирования отсчетов моментов времени, определяемых сменой его значений. Такая модель результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования позволяет аналитически вычислять операции интегрирования при переходе к дискретной обработке сигналов. Следствием этого является возможность разработки математического обеспечения, приводящего к снижению мультипликативной сложности цифровых алгоритмов. В соответствии с этим представляется перспективным рассмотрение вопросов оценки СПМ коррелограммным и периодограммным методами с использованием весовых оконных функций на основе дискретно-событийного представления бинарно-знакового аналого-стохастического квантования сигналов.

**Целью диссертационной работы** является разработка на основе бинарно-знакового аналого-стохастического квантования математического и ресурсно-эффективного алгоритмического обеспечения для вычисления оценок СПМ коррелограммным и периодограммным методами и создание метрологически значимого ПО, предназначенного для использования в составе комплексного ПО ИИС для СА сложных многокомпонентных сигналов.

**Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были решены следующие задачи:**

1) рассмотрены особенности дискретно-событийного представления во времени результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования сигналов для разработки экономичных в вычислительном отношении (с пониженной мультипликативной сложностью) цифровых алгоритмов статистических измерений;

2) разработано математическое и алгоритмическое обеспечение на основе бинарно-знакового аналого-стохастического квантования для вычисления оценок СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм с применением весовых оконных функций;

3) разработано математическое и алгоритмическое обеспечение на основе бинарно-знакового аналого-стохастического квантования для вычисления оценок СПМ коррелограммным методом с применением корреляционных окон;

4) разработано метрологически значимое ПО ИИС для СА в соответствии с компонентно-ориентированной парадигмой и с учетом конструктивной и функциональной однородности программных модулей, реализующих синтезированные алгоритмы оценивания СПМ;

5) на основе имитационного моделирования проведены тестовые испытания разработанного метрологически значимого ПО и алгоритмов его выполнения с целью определения метрологических характеристик;

6) исследованы особенности практического использования разработанного метрологически значимого ПО в составе комплексного ПО ИИС для статистического анализа в условиях обработки реальных сложных сигналов.

**Объект исследования** – СА сложных многокомпонентных сигналов.

**Предмет исследования** – коррелограммный и периодограммный методы оценивания спектральной плотности мощности на основе бинарно-знакового аналого-стохастического квантования сигналов.

**Научная новизна диссертационной работы**

1) Обосновано применение дискретно-событийного представления во времени результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования сигналов для разработки математического обеспечения вычисления оценок СПМ с учетом использования оконных функций периодограммным и коррелограммным методами, что обеспечило аналитическое вычисление операций интегрирования при переходе от аналоговых к дискретным процедурам обработки сигналов.

2) Разработано математическое и ресурсно-эффективное алгоритмическое обеспечение для оценки СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм, отличительной особенностью которого является то, что его практическая реализация сводится к дискретной обработке функций, полученных в результате аналитического вычисления интегральных косинус- и синус-преобразований Фурье весовых оконных функций при переходе от аналоговых к дискретным процедурам.

3) Разработано математическое и ресурсно-эффективное алгоритмическое обеспечение для оценки СПМ коррелограммным методом, которое не требует предварительного вычисления оценки КФ и сводится к дискретной обработке функций, полученных в результате аналитического вычисления косинус-

преобразования Фурье и интегрального преобразования по времени задержки функций корреляционных окон, а также для случая, когда по времени задержки осуществляется равномерная дискретизация при переходе от аналоговых к дискретным процедурам.

4) На основе компонентно-ориентированного программирования разработана многоуровневая композиционная структура метрологически значимого ПО для спектрального анализа, которая с учетом связей и обмена данными между компонентами комплексного ПО ИИС позволяет осуществить системную интеграцию метрологически совместимых программных модулей вычисления коррелограммных и периодограммных оценок СПМ.

**Теоретическая значимость результатов диссертации** заключается в разработке с применением бинарно-знакового аналого-стохастического квантования математического обеспечения для вычисления оценок СПМ сигнала коррелограммным и периодограммным методами в дискретном виде. Особенностью данного математического обеспечения является то, что оно исключает необходимость выполнения операций умножения оконного взвешивания многоуровневых отсчетов анализируемого сигнала при вычислении оценок СПМ. В случае коррелограммного метода не требуется предварительного вычисления оценок КФ.

**Практическая значимость результатов диссертации** заключается в разработке на основе полученного математического обеспечения, ресурсно-эффективного алгоритмического обеспечения и соответствующего ему метрологически значимого ПО для вычисления оценок СПМ коррелограммным и периодограммным методами. Данное ПО представляет собой метрологически совместимые программные модули, разработанные на основе многоуровневой архитектуры и компонентно-ориентированной парадигмы, что обеспечивает возможность его повторного использования в составе комплексного ПО ИИС для СА сигналов с минимальными модификациями на разных вычислительных платформах.

#### **Методология и методы исследования**

В качестве методологической основы решения указанных задач в диссертационной работе использовались методы теории вероятностей и математической статистики, статистических измерений, цифровой обработки сигналов, корреляционно-спектрального анализа. Тестовые испытания метрологически значимого ПО и алгоритмов его выполнения осуществлялись с применением методов численного и имитационного моделирования.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1) математическое и алгоритмическое обеспечение для вычисления оценок СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм, в основе которых лежит дискретная обработка функций, являющихся результатом аналитического вычисления косинус и синус преобразований Фурье весовых оконных функций;

2) математическое и алгоритмическое обеспечения для вычисления оценок СПМ коррелограммным методом, основу которого составляет дискретная обработка функций, являющихся результатом аналитического вычисления косинус преобразования Фурье и интегрального преобразования по времени задержки функций корреляционных окон, а также для случая, когда по времени задержки осуществляется равномерная дискретизация;

3) метрологически значимое ПО для СА сигналов разработанное с учетом конструктивной и функциональной однородности программных модулей, реализующих синтезированные алгоритмы вычисления коррелограммных и периодограммных оценок СПМ;

4) методика и результаты тестовых испытаний и функциональной проверки программных модулей на соответствие требованиям, предъявляемых к метрологически значимому ПО ИИС.

#### **Соответствие паспорта специальности**

Результаты исследования соответствуют пунктам паспорта специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы: п. 3 «Математическое, алгоритмическое, информационное, программное и аппаратное обеспечение информационно-измерительных и управляющих систем»; п. 4 «Расширение функциональных возможностей информационно-измерительных и управляющих систем на основе применения методов измерений контролируемых параметров объектов для различных предметных областей исследования».

**Достоверность результатов исследования** обеспечена использованием современного сертифицированного научно-исследовательского оборудования, необходимым количеством полученных экспериментальных данных и подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах.

#### **Апробация результатов работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA)» (Москва, 2015-2020, 2023); Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (Санкт-Петербург, 2015-2017); Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (Воронеж, 2018-2020); Международной научной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2018, 2019); Международной научно-практической конференции «Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации» (Пенза, 2016).

Исследования проводились в рамках выполнения грантов РФФИ: 16-08-00269 А «Теория и методология разработки комплексного математического и алгоритмического обеспечения многофункциональных систем для вычисления оценок вероятностных характеристик случайных процессов на основе знаковой модели аналого-стохастического квантования»; 19-08-00228 А «Разработка методологии, математического и высокопроизводительного алгоритмического обеспечения для частотно-временного анализа на основе бинарного дискретного представления сигналов».

#### **Реализация результатов исследований**

Диссертационная работа выполнена в рамках Программы развития Самарского государственного технического университета до 2025 года, утвержденной решением Ученого совета СамГТУ от 26.02.2021, протокол № 7. Результаты диссертационной работы апробированы при проведении 3-х мерной виброметрии активных и пассивных элементов конструкции низкопольного городского автобуса второго поколения МАЗ 206067, что подтверждается Актом об использовании результатов диссертационной работы ОАО «МАЗ»-управляющей компании хол-

динга «БЕЛАВТОМАЗ». Материалы диссертационной работы также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Самарского государственного технического университета» (г. Самара) при подготовке бакалавров и магистров по направлению 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств».

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 2 в изданиях, индексируемых наукометрическими базами Web of Science и Scopus, 9 в рецензируемых изданиях из перечня ВАК России, а также 5 свидетельств об официальной регистрации программы для ЭВМ.

### **Личный вклад автора**

Результаты, определяющие научную новизну, получено автором лично. В публикациях, выполненных в соавторстве, автору принадлежит в работах: [1,2,3,4,8,10,12,16,20,22,24] – математическая и практическая реализация алгоритма оценки СПМ коррелограммным методом; в [7,19,23,25,26] – математическая и практическая реализация алгоритма оценки СПМ периодограммным методом; в [9,13,15,17,18,21] – разработка метрологически значимого ПО ИИС для СА; в [6,11] – моделирование сигналов и их обработка; в [5,14] – постановка задачи и экспериментальные исследования оценивания СПМ сигналов.

### **Структура диссертации**

Общий объем работы 175 страниц. Диссертация состоит из введения, четырех разделов и заключения, изложенных на 151 странице, включая 39 рисунков, 20 таблиц, а также содержит список использованных источников из 143 наименований на 16 страницах и 7 приложений на 7 страницах.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, охарактеризована научная новизна, показаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения и сведения по апробации работы.

**В первом разделе** рассматриваются математические основы оценки СПМ периодограммным и коррелограммным методами. В случае стационарного и эргодического сигнала  $X(t)$  спектральному анализу на интервале времени  $T$  подвергается его центрированная реализация  $\overset{o}{x}(t)$ . Периодограммная оценка СПМ вычисляется непосредственно на основе Фурье-преобразования такой реализации. Вычисление коррелограммной оценки СПМ основано на Фурье-преобразовании оценки корреляционной функции (КФ)  $R_{xx}(\tau)$  сигнала.

На практике время анализа  $T$  ограничено. Это приводит к «утечки» энергии в боковые лепестки оценки СПМ. Для снижения этого эффекта используют модифицированные периодограммный и коррелограммный методы с применением соответственно временных оконных функций  $w(t)$  и корреляционных окон  $h(\tau)$ . С целью дополнительного сглаживания периодограммных оценок СПМ осуществляют их усреднение. Всё это приводит к необходимости выполнения существенного числа операций умножения при переходе к цифровым алгоритмам вычисления оценок СПМ.



При цифровой обработке сигналов особое функциональное значение имеет их преобразование в цифровую форму, т.к. оно во многом определяет эффективность цифровых процедур. Перспективным направлением является рандомизация преобразования сигнала в цифровую форму с использованием вспомогательных рандомизирующих сигналов с известными вероятностными характеристиками. Один из таких подходов к аналого-цифровому преобразованию основан на бинарно-знаковом аналого-стохастическом квантовании,:

$$z(t) = +1, \text{ если } x(t) \geq \xi(t); \quad z(t) = -1, \text{ если } x(t) < \xi(t). \quad (1)$$

В (1)  $\xi(t)$  – рандомизирующий сигнал. Он имеет равномерное распределение в диапазоне от  $-\xi_{\max}$  до  $+\xi_{\max}$ , где  $\xi_{\max}$  с вероятностью близкой к единице больше максимально возможного абсолютного значения  $x(t)$ .

Динамика изменения  $z(t)$  на интервале  $t_0 \leq t \leq t_0 + T$  определяется моментами времени смены его значений  $\{t_i^Z : i = 1, 2, 3, \dots, (I-1)\}$ :

$$z(t) = z(t_0)(-1)^i, \text{ где } t_i^Z \leq t \leq t_{i+1}^Z, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, (I-1), \quad t_0^Z = t_0 \text{ и } t_I^Z = t_0 + T. \quad (2)$$

Такая дискретно-событийная модель  $z(t)$  сохраняет информацию о пространственно-временных характеристиках сигнала. На практике формируются целочисленные оценки  $t_i^Z$ :

$$\eta_i^Z = \text{int} [t_i^Z / \Delta t] - \text{целая часть числа } t_i^Z / \Delta t; \quad \Delta t - \text{период счетных импульсов} \quad (3)$$

**Второй раздел** посвящен разработке математического и алгоритмического обеспечения оценки СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм. Согласно этому методу, на интервале времени анализа  $T_A$  рассматривается псевдоансамбль из  $M$  сегментов результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования  $z(t)$ . Для  $m$ -ого сегмента с учётом смещения  $\Delta T$  имеем:

$$z(m, t) = z(t_0 + t + (m-1)\Delta T), \quad 0 \leq t \leq T \text{ и } 0 \leq t \leq T. \quad (4)$$

Модифицированная периодограммная оценка СПМ  $z(m, t)$  равна:

$$\hat{S}_{XX}(m, f, T) = \frac{\xi_{\max}^2}{TU} |\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)|^2, \quad \hat{S}_{ZZ}(m, f, T) = \int_0^T z(m, t)w(t) \exp(-j2\pi ft) dt, \quad (5)$$

где  $w(t)$  – оконная функция и  $U$  её средняя мощность.

Усредненная модифицированная периодограммная оценка СПМ равна:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{S}_{XX}(m, f, T). \quad (6)$$

Функцию  $\hat{S}_{XX}(m, f, T)$  представим:

$$\hat{S}_{XX}(m, f, T) = \frac{\xi_{\max}^2}{TU} \left( (\text{Re}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)])^2 + (\text{Im}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)])^2 \right) \quad (7)$$

$$\operatorname{Re}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = \int_0^T z(m, t)w(t) \cos 2\pi f t dt, \quad \operatorname{Im}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = \int_0^T z(m, t)w(t) \sin 2\pi f t dt.$$

Введем в рассмотрение функции:

$$w_{\cos}(t, f) = w(t) \cos 2\pi f t \quad \text{и} \quad w_{\sin}(t, f) = w(t) \sin 2\pi f t. \quad (8)$$

Нижней и верхней границами сегмента  $z(m, t)$  будут моменты времени  $t_{H,m} = t_0 + (m-1)\Delta T$  и  $t_{B,m} = t_0 + (m-1)\Delta T + T$ . Тогда будем иметь:

$$\operatorname{Re}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = \int_{t_{H,m}}^{t_{B,m}} z(t)w_{\cos}(t - t_{H,m}, f) dt, \quad (9)$$

$$\operatorname{Im}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = \int_{t_{H,m}}^{t_{B,m}} z(t)w_{\sin}(t - t_{H,m}, f) dt \quad (10)$$

Согласно (2) на интервале времени анализа  $T_A$  для  $z(t)$  имеем множество отсчетов времени  $\{t_i^Z : i = 1, 2, 3, \dots, (I-1)\}$ . Введем обозначения  $t_{H,m} = t_{\mathfrak{Q}(m)}^Z$  и  $t_{B,m} = t_{\mathfrak{Q}(m)+r(m)+1}^Z$ , где  $\mathfrak{Q}(m)$  и  $r(m)$  целые числа. Тогда для  $z(m, t)$  на интервале времени его определения  $t_{H,m} \leq t \leq t_{B,m}$  будем иметь подмножество отсчетов  $\{t_{\mathfrak{Q}(m)+1}^Z, t_{\mathfrak{Q}(m)+2}^Z, \dots, t_{\mathfrak{Q}(m)+j}^Z, \dots, t_{\mathfrak{Q}(m)+r(m)}^Z\} \in \{t_i^Z : i = 1, 2, 3, \dots, (I-1)\}$ . С учетом этого для  $z(m, t)$  достаточно знать значение  $z(t_{H,m})$  при известном  $z(t_0)$ . Тогда получаем:

$$\operatorname{Re}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = z(t_{H,m}) \sum_{j=0}^{r(m)} (-1)^j \int_{t_{\mathfrak{Q}(m)+j}^Z}^{t_{\mathfrak{Q}(m)+j+1}^Z} w_{\cos}(t - t_{H,m}, f) dt, \quad (11)$$

$$\operatorname{Im}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = z(t_{H,m}) \sum_{j=0}^{r(m)} (-1)^j \int_{t_{\mathfrak{Q}(m)+j}^Z}^{t_{\mathfrak{Q}(m)+j+1}^Z} w_{\sin}(t - t_{H,m}, f) dt. \quad (12)$$

Функции  $w_{\cos}(t, f)$  и  $w_{\sin}(t, f)$  являются непрерывными и детерминированными. Поэтому существуют непрерывные функции  $W_{\cos}(t, f)$  и  $W_{\sin}(t, f)$ , для которых на любом интервале  $t_{H,m} \leq t \leq t_{B,m}$  выполняется условие дифференцируемости. Эти функции являются первообразными для  $w_{\cos}(t, f)$  и  $w_{\sin}(t, f)$ :

$$\int w_{\cos}(t, f) dt = W_{\cos}(t, f), \quad \int w_{\sin}(t, f) dt = W_{\sin}(t, f). \quad (13)$$

Тогда интегралы в (11) и (12) по переменной  $t$  вычисляются аналитически:

$$\operatorname{Re}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = z(t_{H,m}) (A_{\operatorname{Re}}(m, f) - 2B_{\operatorname{Re}}(m, f)), \quad (14)$$

$$\operatorname{Im}[\hat{S}_{ZZ}(m, f, T)] = z(t_{H,m}) (A_{\operatorname{Im}}(m, f) - 2B_{\operatorname{Im}}(m, f)). \quad (15)$$

$$A_{\operatorname{Re}}(m, f) = (-1)^{r(m)} W_{\cos}(T, f) - W_{\cos}(0, f), \quad B_{\operatorname{Re}}(m, f) = \sum_{j=1}^{r(m)} (-1)^j W_{\cos}(t_{j,m}, f), \quad (16)$$

$$A_{\text{Im}}(m, f) = (-1)^{r(m)} W_{\sin}(T, f) - W_{\sin}(0, f), \quad B_{\text{Im}}(m, f) = \sum_{j=1}^{r(m)} (-1)^j W_{\sin}(t_{j,m}, f). \quad (17)$$

На основе (6), (7), (14)–(17) разработано метрологически значимое алгоритмическое обеспечение, основными операциями которого являются логические операции и операции суммирования с соответствующим знаком значений функций  $W_{\cos}(t, f)$  и  $W_{\sin}(t, f)$ , вид которых определяется видом функций  $w(t)$ . Операции умножения практически отсутствуют. Аналитическое вычисление интегральных преобразований в (11) и (12) исключает методическую погрешность выполнения этих операций в дискретном виде, которая свойственна классическим алгоритмам периодограммной оценки СПМ.

В процессе обработки  $z(m, t)$  используются числовые значения  $T_A$ ,  $T$ ,  $\Delta T$  и  $t_i^Z$  согласно (3). Оценки СПМ вычисляются на частотах  $f_k = k\Delta f$  с максимально возможным разрешением  $\Delta f = 1/T$ .

Для прямоугольного (естественного) окна и наиболее известных окон, таких как треугольное (Бартлетта), косинусное, сумма-косинусное, Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла рассмотрены функции  $W_{\cos}(t, f)$  и  $W_{\sin}(t, f)$ . В частности, для прямоугольного (естественного) окна имеем:

$$w(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq T; \\ 0, & |t| > T. \end{cases} \quad U = 1.$$

$$W_{\cos}(t, f) = \frac{\sin 2\pi ft}{2\pi f}, \quad W_{\cos}(\eta_i^Z, f_k) = \frac{1}{2\pi k \Delta f} \sin \frac{2\pi k}{N} \eta_i^Z; \quad (18)$$

$$W_{\sin}(t, f) = -\frac{\cos 2\pi ft}{2\pi f}, \quad W_{\sin}(\eta_i^Z, f_k) = -\frac{1}{2\pi k \Delta f} \cos \frac{2\pi k}{N} \eta_i^Z.$$

**В третьем разделе** рассматривается разработка математического и алгоритмического обеспечения для оценки СПМ коррелограммным методом. При этом используется оценка КФ следующего вида:

$$\hat{R}_{XX}(\tau) = \frac{\xi_{\max}^2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} z_1(t) z_2(t+\tau) dt. \quad (19)$$

В (19)  $z_1(t)$  и  $z_2(t)$  формируются на интервалах  $T$  и  $2T$  с применением независимых вспомогательных сигналов  $\xi_1(t)$  и  $\xi_2(t)$ . Тогда для  $0 \leq \tau \leq T$  оценка КФ будет несмещенной. Коррелограммная оценка СПМ будет иметь вид:

$$\hat{S}_{XX}(f) = \frac{2\xi_{\max}^2}{T} \int_0^T \int_{t_0}^{t_0+T} z_1(t) z_2(t+\tau) h(\tau) \cos 2\pi f \tau dt d\tau. \quad (20)$$

С учётом (2) для  $z_1(t)$  имеем  $t_0^{Z1} = t_0$ ,  $t_i^{Z1} = t_0 + T$  и  $\{t_i^{Z1} : i = 1, 2, 3, \dots, (I-1)\}$ . Введя  $h_{\cos}(\tau, f) = h(\tau) \cos 2\pi f \tau$ , представим (20) в виде:

$$\hat{S}_{XX}(f) = z_1(t_0) \frac{2\xi_{\max}^2}{T} \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i A_i(f), \text{ где } A_i(f) = \int_{t_i^{Z_1}}^{t_{i+1}^{Z_1}} \int_t^{t+T} z_2(\tau) h_{\cos}(\tau-t, f) d\tau dt. \quad (21)$$

Изменив порядок интегрирования, получаем:

$$A_i(f) = \sum_{j=1}^3 B_{j,i}(f), \text{ где } B_{1,i}(f) = \int_{t_i^{Z_1}}^{t_{i+1}^{Z_1}} z_2(\tau) \int_0^{\tau-t_i^{Z_1}} h_{\cos}(t, f) dt d\tau, \quad (22)$$

$$B_{2,i}(f) = \int_{t_i^{Z_1}}^{t_{i+1}^{Z_1}} z_2(\tau) \int_{\tau-t_{i+1}^{Z_1}}^{\tau-t_i^{Z_1}} h_{\cos}(t, f) dt d\tau, \quad B_{3,i}(f) = \int_{t_i^{Z_1}}^{t_{i+1}^{Z_1}} z_2(\tau) \int_{\tau-t_{i+1}^{Z_1}}^T h_{\cos}(t, f) dt d\tau$$

Функция  $h_{\cos}(\tau, f)$  является известной и непрерывной. Поэтому, как и в случае периодограммного метода существует непрерывная функция  $H_{\cos}(\tau, f)$ , для которой на интервале  $0 \leq \tau \leq T$  выполняется условие ее дифференцируемости:

$$\int h_{\cos}(t, f) dt = H_{\cos}(t, f). \quad (23)$$

Тогда внутренние интегралы в (24) вычисляются аналитически, и получаем:

$$\hat{S}_{XX}(f) = V(f) + D \sum_{i=0}^I (-1)^i \lambda_i Q(t_i^{Z_1}, f), \quad (24)$$

$$V(f) = 2H_{\cos}(T, f) \hat{R}_{XX}(T) - 2H_{\cos}(0, f) \hat{R}_{XX}(0), \quad D = z_1(t_0) 2\xi_{\max}^2 / T = \text{Const};$$

$$\lambda_i = 1, \text{ если } i = 0, i = I; \lambda_i = 2, \text{ если } i = 1, 2, 3, \dots, (I-1).$$

$$Q(t_i^{Z_1}, f) = \int_0^T z_2(\tau + t_i^{Z_1}) H_{\cos}(\tau, f) d\tau \quad (25)$$

Осуществим дискретизацию в (25) по  $\tau$  с шагом  $\Delta\tau = \text{const}$  :

$$Q(t_i^{Z_1}, f) = \Delta\tau \sum_{j=0}^{L-1} z_2(j\Delta\tau + t_i^{Z_1}) H_{\cos}(j\Delta\tau, f) \quad (26)$$

Подставив (26) в (24) и изменив порядок суммирования, имеем:

$$\hat{S}_{XX}(f) = V(f) + \Delta\tau D \sum_{j=0}^{L-1} C(j\Delta\tau) H_{\cos}(j\Delta\tau, f), \text{ где} \quad (27)$$

$$C(j\Delta\tau) = \sum_{i=0}^I (-1)^i \lambda_i z_2(j\Delta\tau + t_i^{Z_1}) = \rho(j\Delta\tau) + 2\beta(j\Delta\tau, t_i^{Z_1}), \quad (28)$$

$$\rho(j\Delta\tau) = z_2(j\Delta\tau + t_0) + (-1)^I z_2(j\Delta\tau + t_0 + T),$$

$$\beta(j\Delta\tau, t_i^{Z_1}) = \sum_{i=1}^{I-1} (-1)^i z_2(j\Delta\tau + t_i^{Z_1}). \quad (29)$$

Соотношения (27) – (29) с учетом (3) определяют алгоритм вычисления коррелограммной оценки СПМ с разрешением  $\Delta f = 1 / \Delta t N$ . При этом не требуется предварительного вычисления оценки КФ.

В (27) результат суммирования можно рассматривать как сумму отсчетов  $C(j\Delta\tau)$  с весами  $H_{\cos}(j\Delta\tau, f)$ . При этом значения  $H_{\cos}(j\Delta\tau, f)$  известны, т.к. вид

функции  $H_{\cos}(\tau, f)$  определяется видом  $h(\tau)$ . Вычисление  $C(j\Delta\tau)$  сводится к операциям суммирования с соответствующим знаком  $z_2(j\Delta\tau + t_i^{Z_1})$ , которые равны  $-1$  или  $+1$ , т.е.  $C(j\Delta\tau)$  будет целым числом.

Соотношение (27) получено в результате равномерной дискретизации оператора интегрирования в (25) по  $\tau$ . С целью совершенствования алгоритма коррелограммной оценки СПМ вычислим этот интеграл с учётом дискретно-временного представления  $z_2(t)$  также как и  $z_1(t)$ . Для  $z_2(t)$  имеем  $t_0^{Z_2} = t_0$ ,  $t_j^{Z_2} = t_0 + 2T$  и отсчёты  $\{t_j^{Z_2} : j = 1, 2, 3, \dots, (J-1)\}$ . Запишем (25) в виде:

$$Q(t_i^{Z_1}, f) = \int_{t_i^{Z_1}}^{t_i^{Z_1} + T} z_2(\tau) H_{\cos}(\tau - t_i^{Z_1}, f) d\tau \quad (30)$$

В (30) пределах интервала интегрирования для  $z_2(t)$  соответствуют моменты времени  $t_{m(i)}^{Z_2} = t_i^{Z_1}$  и  $t_{m(i)+r(i)+1}^{Z_2} = t_i^{Z_1} + T$ , где  $m(i)$  и  $r(i)$  зависят от номера этого интервала. На этом интервале для  $z_2(t)$  имеем:

$$\{t_k^{Z_2} : k = m(i) + 1, m(i) + 2, m(i) + 3, \dots, m(i) + r(i)\} \in \{t_j^{Z_2} : 0 \leq j \leq J\}. \quad (31)$$

С учетом этого получаем:

$$Q(t_i^{Z_1}, f) = z_2(t_i^{Z_1}) \sum_{j=m(i)}^{m(i)+r(i)} (-1)^{j-m(i)} \int_{t_j^{Z_2} - t_i^{Z_1}}^{t_{j+1}^{Z_2} - t_i^{Z_1}} H_{\cos}(\tau, f) d\tau. \quad (32)$$

Согласно теореме о непрерывности функции существует функция  $G(\tau, f)$ , для которой выполняется условие дифференцируемости:

$$\int H_{\cos}(\tau, f) d\tau = G(\tau, f). \quad (33)$$

Тогда интегралы в (32) вычисляются аналитически:

$$Q(t_i^{Z_1}, f) = z_2(t_i^{Z_1}) \sum_{j=0}^{r(i)+1} (-1)^{j+1} \gamma_j G(t_{j+m(i), i}, f), \quad \text{где } t_{j+m(i), i} = t_{j+m(i)}^{Z_2} - t_i^{Z_1} \quad (34)$$

$$\gamma_j = 1, \quad \text{если } j = 0 \text{ и } j = r(i) + 1; \quad \gamma_j = 2, \quad \text{если } j = 1, 2, 3, \dots, r(i).$$

Из (34) следует, что коррелограммная оценка СПМ (24) вычисляется без операций умножений и сводятся к обработке  $G(\tau, f)$  для отсчетов времени  $t_{ji} = t_j^{Z_2} - t_i^{Z_1}$ . При этом аналитическое вычисление операций интегрирования включает методическую погрешность их выполнения в дискретном виде.

На основе (24) – (29) и (34) разработано метрологически значимое алгоритмическое обеспечение для вычисления коррелограммных оценок СПМ.

Рассмотрены функции  $H_{\cos}(\tau, f)$  и  $G(\tau, f)$  для классических корреляционных окон: прямоугольного, треугольного (Бартлетта), косинусного, сумма-косинусного, Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла. Функции  $H_{\cos}(\tau, f)$  идентичны

функциям  $W_{\cos}(t, f)$ . В качестве примера приведена функция  $G(\tau, f)$  для прямоугольного (естественного) окна (18).

$$G(\tau, f) = -\frac{\cos 2\pi f\tau}{(2\pi f)^2}, \quad G(\eta_i, f_k) = -\left(\frac{1}{2\pi k\Delta f}\right)^2 \cos \frac{2\pi k}{N} \eta_i. \quad (35)$$

**В четвёртом разделе** рассматривается программная реализация разработанных алгоритмов вычисления оценок СПМ. ПО разработано с учетом требований, предъявляемых к метрологически значимому ПО ИИС (ГОСТ Р 8.654-2015). Для реализации требований использовались паттерны проектирования и интегрированные среды программирования, которые определили структуру ПО ИИС в виде функционально независимых модулей, с возможностью их комплексирования и параллельного выполнения. Основным результатом выполнения требований к структурной организации ПО ИИС стало выделение метрологически значимой и незначимой частей ПО ИИС в виде многоуровневой архитектуры. Взаимодействие между уровнями осуществляется через программный интерфейс с использованием кросс-языковых конвертеров (см. рис. 1).

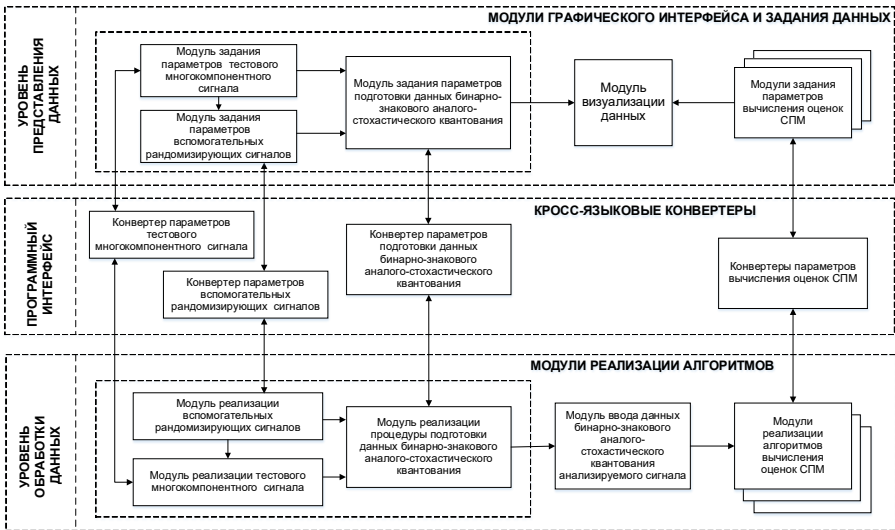


Рисунок 1 – Структурная схема модульной организации ПО

Модульная архитектура позволила обеспечить разделение ответственности программных компонентов. Каждый компонент отвечает за выполнение своей задачи и взаимодействует с модулями других уровней по установленным связям через кросс-языковые интерфейсы. Компонентно-ориентированная парадигма определила организацию и хранение вычислительных компонентов и экземпляров классов в программных модулях в виде классов-контейнеров. Основу ПО составили четыре класса-контейнеров: 1) для передачи данных о моделируемом тестовом сигнале; 2) для передачи данных в штатном режиме функционирования; 3) для получения данных и их анализа; 4) для передачи результатов вычисления

оценок СПМ. Каждый класс-контейнер содержит классы, реализующие соответствующую логику и функциональность модулей.

На рис. 2 показана схема ПО ИИС взаимодействия и обмена данными между классами метрологически значимой и незначимой частями ПО ИИС. Класс MainController – корневой обработчик событий между интерфейсом метрологически значимой ПО и модулем бинарно-знакового квантования. Этот модуль формирует целочисленные отсчеты времени сигналов (3), полученных с датчиков. Класс QuantumBridge выполняет функции кросс-языкового конвертера между метрологически значимой и незначимой частями ПО ИИС.

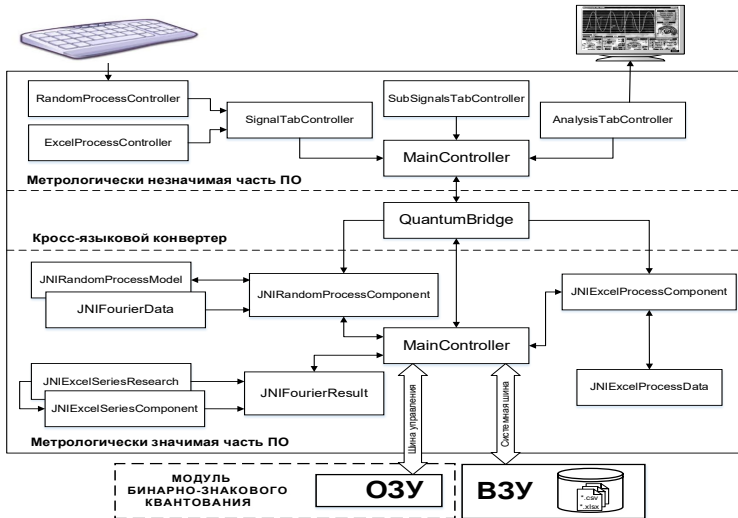
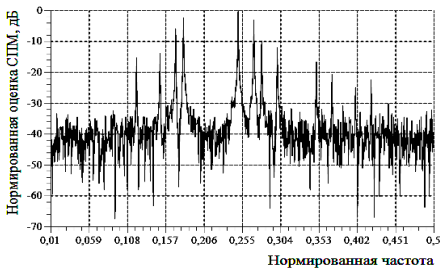


Рисунок 2 – Диаграмма взаимодействия классов-контейнеров ПО ИИС

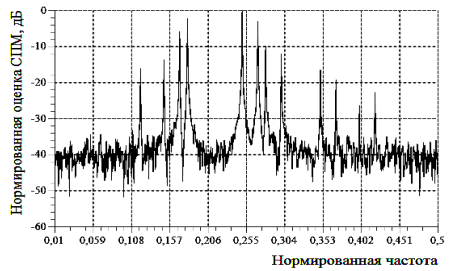
На основе имитационного моделирования проводились тестовые испытания разработанного ПО. Модель тестового сигнала представляла собой сумму гармоник со случайными фазами в аддитивном шуме с нулевым средним значением и дисперсией  $\sigma_e^2 = 1$ . Значения амплитуд  $A_k^n$  и частот  $f_k^n$  гармоник интерпретировались как нормированные. В частности, модель состояла из 12 гармоник, параметры которых приведены в таблице 1, где  $Ps = (A_k^n / \sqrt{2})^2$  и  $Pe = \sigma_e^2 = 1$  мощность гармоники и шума. На рис. 3 представлены нормированные периодограммные оценки СПМ для треугольного (Барлетта) окна, вычисленные по 1-ому, 3-ем, 5-ти и 7-ми сегментам с 50% перекрытием. С увеличением числа сегментов влияние шума на оценку СПМ снижается. Положение оценок гармоник в спектре соответствует исходным значениям. Ложных спектральных линий нет. Оценки СПМ вычислены с разрешением 0,0005 единиц нормированной частоты. На рис. 4 представлены нормированные коррелограммные оценки СПМ, где  $Q(t_i^A, f)$  вычислялось согласно (35). Наблюдается однозначное разрешение гармоник по частоте в белом шуме, сильные гармоники не маскируют слабые, а их положение в спектре соответствует заданным частотам.

Таблица 1 – Параметры гармонических компонент модели сигнала

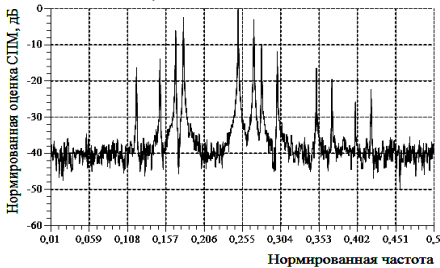
k	$f_k^H$	$A_k^H$	$(A_k^H / A_{\max}^H)^2$	$(A_k^H / A_{\max}^H)^2, dB$	$P_s / P_e, dB$
1	0,12	0,15	0,0225	-16,4782	-19,49
2	0,15	0,2	0,04	-13,9794	-16,99
3	0,17	0,5	0,25	-6,0206	-9,03
4	0,18	0,75	0,5625	-2,4988	-5,5091
5	0,25	1,0	1	0	-3,0103
6	0,27	0,7	0,49	-3,0980	-6,1083
7	0,28	0,3	0,09	-10,4576	-13,4679
8	0,3	0,25	0,0625	-12,0412	-15,0515
9	0,35	0,15	0,0225	-16,4782	-19,4885
10	0,37	0,1	0,01	-20,0000	-23,0103
11	0,40	0,05	0,0025	-26,0206	-29,0309
12	0,42	0,07	0,0049	-23,0980	-26,1083



а) один сегмент



б) три сегмента

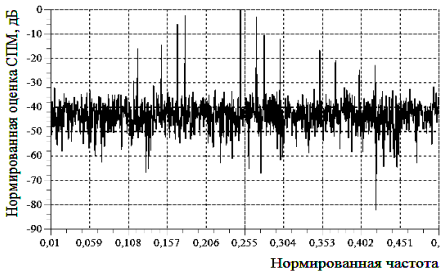


в) пять сегментов

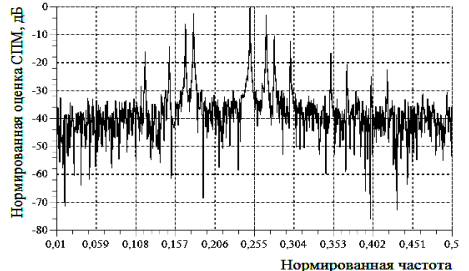


г) семь сегментов

Рисунок 3 - Нормированные периодограммные оценки СПМ: треугольное (Бартлетта) окно



а) естественное окно



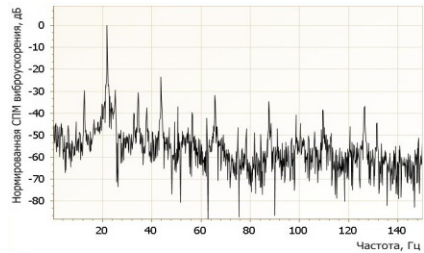
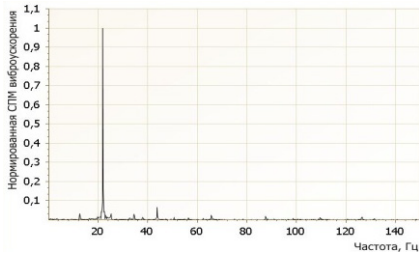
б) окно Бартлетта

Рисунок 4 – Нормированные коррелограммные оценки СПМ

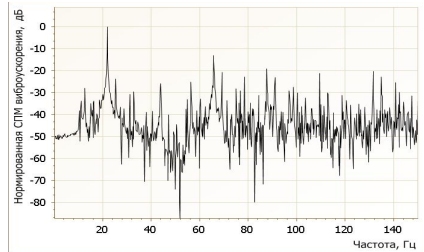
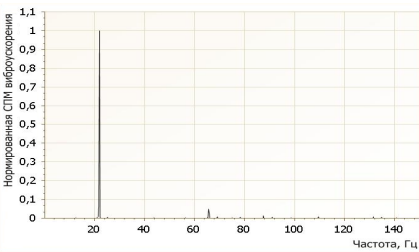


Разработанные алгоритмы применялись при проведении 3-х мерной виброметрии конструкций автобуса МАЗ-206067. Для регистрации вибрационных сигналов использовались акселерометры со встроенной электроникой ICP общего назначения 352C04 с разрешением  $0,005 \text{ м/с}^2$  фирмы «PCB Piezotronics, Inc.».

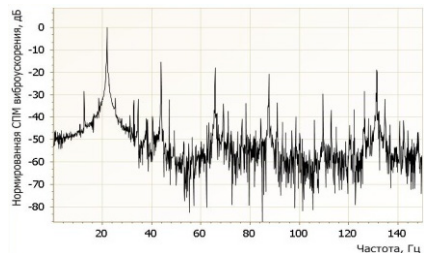
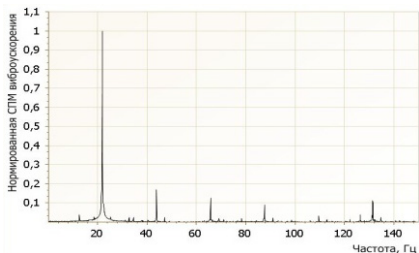
Частотный диапазон вибрационных сигналов находился в пределах 200 Гц. Частота дискретизации была равна 51200 Гц. Длительность измерений составляла 110 секунд. Наибольшей интенсивности вибрационные сигналы достигали в режиме холостого хода на частоте 22 Гц. На рис.5 приведены графики оценок СПМ вибрационных сигналов для частоты вращения двигателя 750 об/мин.



а) рулевое колесо водителя



б) боковое оконное стекло



в) пассажирское сиденье над задним мостом

Рисунок 5 – Нормированные оценки СПМ вибрационного сигнала

Разработанные алгоритмы обеспечили устойчивое обнаружение гармонических колебаний. Достоверность, проведенных экспериментальных исследований подтверждены Актом об использовании результатов диссертационной работы от завода-изготовителя ОАО «МАЗ». Рекомендации по подавлению интенсивной вибрации были учтены при проектировании первой модели низкопольного городского автобуса третьего поколения МАЗ-303065.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были получены следующие научные результаты:

### Основные результаты и выводы по работе:

1) Обоснована актуальность разработки математического и ресурсно-эффективного алгоритмического обеспечения для СА сложных сигналов коррелограммным и периодограммным методами с применением бинарно-знакового аналого-стохастического квантования;

2) Дискретно-событийное представление во времени результата бинарно-знакового аналого-стохастического квантования позволило ещё на математическом уровне при переходе от аналоговых к дискретным процедурам осуществить аналитическое вычисление операторов интегрирования, что существенно сокращает необходимость выполнения операций умножения в цифровом виде;

3) Разработано математическое и соответствующее ему алгоритмическое обеспечение для вычисления оценок СПМ методом усредненных модифицированных периодограмм. При этом в их основе лежат только логические операции и арифметические операции суммирования и вычитания дискретных во времени значений функций  $W_{\cos}(t, f)$  и  $W_{\sin}(t, f)$ , являющихся первообразными вычисления косинус- и синус-преобразований Фурье применяемой оконной функций  $w(t)$ ;

4) Разработаны математическое и соответствующее ему алгоритмическое обеспечение для вычисления оценок СПМ коррелограммным методом. При этом операции интегрирования по переменной времени  $t$  вычисляются аналитически, а операция интегрирования по времени задержки  $\tau$  вычисляется численно с равномерным шагом. В результате вычисление оценки СПМ сводится к обработке отсчётов функции  $H_{\cos}(\tau, f)$ , являющейся первообразной косинус-преобразования функции применяемого корреляционного окна  $h(\tau)$ . Одновременно разработано математическое и алгоритмическое обеспечение для вычисления оценок СПМ, когда операция интегрирования по времени задержки  $\tau$  также вычисляется аналитически. В этом случае дискретной обработке подвергаются отсчёты функции  $G(\tau, f)$ , являющейся первообразной функции  $H_{\cos}(\tau, f)$ . Вид функций  $H_{\cos}(\tau, f)$  и  $G(\tau, f)$  определяются только видом применяемой  $h(\tau)$ . При этом предварительного вычисления оценки КФ не требуется;

5) На основе синтезированных алгоритмов вычисления коррелограммных и периодограммных оценок СПМ разработано метрологически значимое ПО. Компонентно-ориентированная парадигма и выделение метрологически значимой и незначимой частей ПО в отдельные уровни абстракции позволили реализовать метрологически значимое ПО ИИС в виде совокупности метрологически совместимых программных модулей с возможностью их комплексирования, модификации и повторного использования;

6) Проведённые тестовые испытания разработанных алгоритмов и ПО показали, что разработанное алгоритмического обеспечения позволяет получать оценки СПМ с высокой разрешающей способностью по частоте. При этом эффекты маскирования и расщепления гармонических составляющих отсутствуют.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ:**

1. Якимов В.Н., Машков А.В. Цифровой спектральный анализ на основе знакового оценивания корреляционной функции и косинус-преобразования корреляционного окна // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2015. – № 8 (58). – С. 36-41.

2. Якимов В.Н., Батищев В.И., Машков А.В. Последовательная идентификация линейной динамической системы на основе корреляционного метода обработки знаковых сигналов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2016. – № 5. – С. 26-30.

3. Якимов В.Н., Машков А.В. Алгоритм вычисления оценки спектральной плотности мощности на основе обработки знаковых сигналов с использованием временных весовых функций // Цифровая обработка сигналов. – 2016. – № 4. – С. 3-8.

4. Якимов В.Н., Машков А.В. Оценивание спектральной плотности мощности на основе коррелогограммного метода с использованием бинарного знакового аналого-стохастического квантования случайного процесса // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2017. – Т.18, №9. – С. 604-611.

5. Якимов В.Н., Машков А.В. Цифровой алгоритм оценивания спектрального состава многокомпонентного процесса вибрации // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 8. – С. 40-45.

6. Якимов В.Н., Машков А.В. Цифровой алгоритм экспериментального оценивания спектрального состава непрерывных сигналов для специализированных систем статистического анализа // Датчики и системы. – 2018. – № 6 (226). – С. 25-30.

7. Якимов В.Н., Машков А.В. Спектральный анализ на основе периодограммного метода обработки сегментов бинарно-квантованного сигнала с применением весовых оконных функций // Цифровая обработка сигналов. – 2021. – № 3. – С. 30-35.

8. Якимов В.Н., Машков А.В. Оценка частотного спектра непрерывного сигнала на основе бинарного стохастического квантования и дискретно-временной обработки спектральной функции корреляционного окна // Датчики и системы. – 2020. – № 2 (244). – С. 10-16.

9. Машков А.В. Разработка программного обеспечения информационно-измерительных систем для частотного анализа бинарно-квантованных сигналов // Вест. Самар. гос. техн. унта. Сер. «Технические науки». – 2023. – Т. 31, №3. – С. 69-82.

**Публикации в изданиях, индексируемых в международных - наукометрических базах WebOfScience и Scopus:**

10. Yakimov V.N., Mashkov A.V. Digital estimation of correlation function moments using analog-stochastic sign quantization of a random process // Measurement Techniques. – 2016. – № 1 (59). – Pp. 12-15. (Web of Science)

11. Yakimov V.N., Batishev V.I., Mashkov A.V. Digital Analysis of the Vibration Signals Amplitude Spectrum Based on Fourier Processing of the Binary-Sign Analog-Stochastic Quantization Result // Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. – 2019. – Vol. 20. – № 12. – Pp. 723-731. (Scopus)

**Публикации в других изданиях:**

12. Yakimov V.N., Mashkov A.V., Susarev S.V., Gubanov N.G., Philimonov A.B. Acoustic diagnostics of pipeline networks based on correlation analysis using binary analog-stochastic quantization // Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM'2017) 7-10 June 2017. – Saint-Petersburg, 2017. – Vol.1. – Pp. 4-7. (Web of Science)

13. Yakimov V.N., Mashkov A.V., Zaberzhinskij B.E., Bukanova Y.V. Multi-threaded Approach to Software High-speed Algorithms for Spectral Analysis of Multi-component Signals // XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP) (3-6 Sept. 2019). – Pp. 698 – 701. (Scopus)

14. Yakimov V.N., Lange P.K., Yaroslavkina E.E., Mashkov A.V. Power Spectral Density Estimation Using Statistical Smoothing of the Linear Difference Model Parameters of the Random Time Series // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok; Russian Federation; – 1-4 Oct. 2019. Publisher: IEEE. – Pp. 1-5. (Web of Science)

15. Якимов В.Н., Батищев В.И., Машков А.В. Модульный подход к разработке информационно-измерительной системы цифрового оценивания спектральной плотности мощности // Методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации: сб. науч. ст. Межд. науч.-техн. конф. «Шлядинские чтения - 2016». – Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. – С. 84-86.

16. Якимов В.Н., Машков А.В. Комплексное оценивание корреляционно-спектральных характеристик непрерывных случайных процессов на основе бинарного стохастического квантования результатов экспериментальных наблюдений // Инженерная физика. – 2017. – № 9. – С. 58-61.

17. Якимов В.Н., Машков А.В., Желонкин А.В. Метрологически значимое программное обеспечение контрольно-измерительной системы для комплексного оперативного спектрального анализа на основе технологии распараллеливания процессорных вычислений // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2019. – № 9. – С. 25-29.

18. Якимов В.Н., Машков А.В., Желонкин А.В. Специализированное программное обеспечение измерительной системы для оперативного оценивания спектрального состава многокомпонентных процессов // Программные продукты и системы. – 2019. – Т. 32, № 1. – с. 159-166.

19. Якимов В.Н., Машков А.В., Желонкин А.В. Оценка частотного состава сигналов на основе Фурье-преобразования с использованием оконного сглаживания и бинарного стохастического квантования // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVI Межд. науч.-тех. конф. – Воронеж: Издат. дом ВГУ, 2020. – С.334-343.

20. Якимов В.Н., Машков А.В. Коррелограммная цифровая оценка спектральной плотности мощности на основе интервального представления результата бинарного стохастического квантования сигналов // Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2020: Сборник докладов 22-ой Межд. конф. Москва, 2020. – М: РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2020. – С. 115-119.

21. Якимов В.Н., Машков А.В. Вычислительно-эффективное алгоритмическое и программное обеспечение для спектрального анализа коррелограммным мето-

дом // Сборник материалов XXV Межд. конф. “Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2023”. – Москва, 2023. – С. 110-115.

### **Объекты интеллектуальной собственности:**

22. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2016612729, РФ. Прикладная программа вычисления спектральной плотности мощности на основе знакового подхода к оцениванию корреляционной функции и интегрального косинус-преобразования функции корреляционного окна / В.Н.Якимов (РФ), А.В.Машков (РФ). – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 09.03.2016. – Заявка №2016610066, 12.01.2016.

23. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ №2016612855, РФ. Прикладная программа для цифрового спектрального анализа на основе периодограммного метода с использованием знакового аналого-стохастического квантования случайного процесса / В.Н.Якимов (РФ), А.В.Машков (РФ). – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 10.03.2016. – Заявка №2016610066, 11.01.2016.

24. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2020665235, РФ. Прикладная программа коррелограммной цифровой оценки спектральной плотности мощности на основе интервального представления бинарного стохастического квантования сигналов / В.Н.Якимов (РФ), А.В.Машков (РФ), А.В.Желонкин (РФ). – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 24.11.2020. – Заявка № 2020663774, 06.11.2020.

25. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2021661939, РФ. Прикладная программа для цифрового спектрального анализа сигналов на основе периодограммного метода обработки псевдоансамбля сегментов бинарно-квантованного сигнала с применением оконных функций / В.Н. Якимов (РФ), А.В. Машков (РФ). – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 20.07.2021. – Заявка № 2021660930, 09.07.2021.

26. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2021667043, РФ. Прикладная программа вычисления усредненной периодограммной оценки спектральной плотности мощности псевдоансамбля с регулируемым заданием смещения перекрывающихся сегментов бинарно-квантованного сигнала и применением весовых оконных функций / В.Н. Якимов (РФ), А.В. Машков (РФ). – Зарег. в Реестре программ для ЭВМ 25.10.2021. – Заявка № 2021665837, 11.10.2021.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.04,  
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный

технический университет»

(протокол № 2 от «09» апреля 2024 г.)

Тираж 100 экз. Заказ № 520.

Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Отпечатано в типографии.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Отдел типографии и оперативной печати,

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244