

На правах рукописи



Аль Рубеи Мохаммед Абдалаббас Тавфик

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ОТКЛОНЕНИЯ
ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

Специальность 2.2.15 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Владимир – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» - (ВлГУ) на кафедре радиотехники и радиосистем.

Научный руководитель:	Поздняков Александр Дмитриевич доктор технических наук, профессор кафедры Радиотехники и радиосистем ВлГУ, г. Владимир.
Официальные оппоненты:	Приоров Андрей Леонидович доктор технических наук, профессор кафедры Цифровых технологий и машинного обучения ФГБОУ ВО «Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова», г. Ярославль. Исакевич Валерий Викторович кандидат технических наук, доцент, директор по развитию, «Общество с ограниченной ответственностью-БизнесСофтСервис», г. Владимир.
Ведущая организация:	Акционерное общество «Конструкторское бюро радиоаппаратуры», (АО КОБРА), г. Москва.

Защита состоится «24» сентября 2024 г. в «14:00» часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», по адресу: г. Владимир, пр. Строителей, д. 3/7, корпус 3 ВлГУ, ауд. 301

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ по адресу г. Владимир, ул. Горького, 87, корпус 1, ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 60000, г. Владимир, ул. Горького, 87 ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01. Тел. (4922)534238, E-mail: ags@vlsu.

Автореферат разослан «26» июня 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.281.01
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Среди контролируемых параметров устройств телекоммуникаций (УТК) наиболее высокие требования предъявляют к стабильности и допустимому отклонению частоты гармонического сигнала. Контроль частоты осуществляют в системах передачи информации, в системах радионавигации и зондирования, при мониторинге радиоканалов и приемо-передающей аппаратуры, в доплеровских системах, в метрологии и метеорологии, в медицине и научных исследованиях. При построении встраиваемых средств контроля, часто использующих методологию построения виртуальных приборов (ВП), аппаратной основой которых являются быстродействующие аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП). Развиваются и совершенствуются алгоритмические методы измерений, основная задача которых состоит в обеспечении достаточной точности оценки параметров сигналов по массиву равномерных дискретных отсчетов сигнала при заданном быстродействии.

Важным требованием к алгоритмам измерения является обеспечение минимальной методической составляющей погрешности (МСП), которая не должна превышать 10% в суммарной погрешности.

Главным противоречивым требованием к встраиваемым средствам является повышение точности измерений и повышение быстродействия при минимальных аппаратных средствах совмещения телекоммуникационных, измерительных и управляющих функций. Детального анализа факторов, определяющих МСП нет, и это затрудняет выбор метода и алгоритма для конкретных применений.

Научной задачей, решаемой в диссертационной работе, является разработка и исследование алгоритмов и программных средств контроля частоты сигнала путем нахождения центра тяжести его спектра на основе метода начального момента случайной величины с выбором его порядка и числа учитываемых спектральных линий.

Необходимо разработать алгоритмы и программные средства, которые позволяют минимизировать методическую составляющую погрешности оценки частоты. Наиболее популярным в частотной области является спектральный анализ с использованием алгоритма БПФ и нахождением положения максимума энергетического спектра. Несмотря на повышенный интерес к проблеме исследования, ряд теоретических задач спектрального анализа не решен. В частности, в настоящее время отсутствуют в общем виде детального анализа

факторов, определяющих МСП нет, и это затрудняет выбор метода и алгоритма для конкретных применений. Необходимо разработать методику и программные средства выбора вида окна, числа учитываемых спектральных линий, числа отсчетов, отношения сигнал/шум, способа интерполяции, отношения частоты сигнала к частоте дискретизации. При влиянии большого числа различных факторов задача оптимизированного выбора параметров цифровой обработки может решаться методами моделирования с созданием пакета рекомендаций.

Степень разработанности. Российские и зарубежные ученые внесли значительный вклад в разработку методов определения параметров сигнала: Harris, Fredric J., Ding K., Eric Jacobsen, Quinn B. G., Jiufei, Shen Ting, Daniel Belega, Jain Vijay K, Каюков И. В., Гришин В. Ю., Розенберг В.Я, Чудников В. В., Ильченко А. В., Мелентьев В.С., С.А., Ковалев И. В., Иванов Ю. М., Попов В.С., Желбаков И.Н., Глинченко А. С., Гнездилов Д.С., и другие.

Целью исследования является разработка и исследование алгоритмов определения отклонения частоты сигнала во встроенных системах контроля путем нахождения центра тяжести спектра на основе метода начального момента случайной величины с выбором его порядка и числа спектральных линий.

Основными задачами исследования являются:

1. Разработка алгоритма определения отклонения частоты гармонического сигнала путем нахождения центра тяжести спектра на основе метода начального момента случайной величины с выбором его порядка.
2. Разработка алгоритма оценки и уменьшения методической погрешности определения частоты по дискретным отсчетам путем выбора четного или нечетного числа линий спектра.
3. Разработка комплексного алгоритма спектрально-весаого метода (СВМ), позволяющий по единой базе отсчетов оценить частоту и СКЗ гармонического сигнала.
4. Разработка алгоритма определения положения центра спектра путем интерполяции по трем компонентам алгоритм «Предлагаемый» для окна Блекман-Харриса.
5. Разработка рекомендаций по уменьшению методической погрешности СВМ при оценке отклонения частоты гармонического сигнала.
6. Создание методик и программных средств моделирования погрешности СВМ для оценки отклонения частоты гармонического сигнала.

Объектом исследования являются методы и алгоритмы измерения частоты

гармонических сигналов по массиву дискретных отсчетов для применений в современных системах встроенного контроля.

Предметом исследования являются спектральные, интерполяционные алгоритмы и программные средства определения отклонения частоты сигналов путем нахождения центра тяжести спектра.

Методы исследований. В работе использованы методы спектрального анализа и интерполяции, имитационного моделирования, цифровой обработки сигналов, применения оконных функций и численные методы решения задач.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложено методику оценки начального момента случайной величины использовать для определения центра тяжести спектра в задаче нахождения отклонения частоты гармонического сигнала.
2. Предложено оптимизировать выбор исходных параметров цифровой обработки в последовательности: число спектральных линий, число отсчетов, оконная функция, отношение частоты сигнала к частоте дискретизации F_c/F_d , и порядок начального момента. Создана библиотека окон с указанием оптимизированных параметров оценки частоты.
3. Разработанные алгоритмы и программные средства определения частоты по дискретным отсчетам позволяют путем учета четного или нечетного числа линий спектра уменьшить методическую погрешность больше, чем на порядок.
4. Модернизирован алгоритм определения положения центра спектра «Спектрально-весовым методом» по двум наибольшим составляющим спектра для окна Кайзера ($\beta=2$), вносящий меньшие методические погрешности, чем известные алгоритмы Ли и Джайна.
5. Разработан алгоритм определения положения центра спектра путем интерполяции по трем компонентам алгоритм «Предлагаемый» для окна Блекман-Харриса, вносящий меньшие методические погрешности, чем известные алгоритмы Якобсена, Динга, Воглеведе.
6. В узкой полосе рабочих частот рекомендуется работать на пологом участке погрешности, позволяющем уменьшить ее на порядок.
7. Установлено, что погрешность интерполяции для разных окон зависит от порядка начального момента.

8. При выборе порядка начального момента необходимо ограничить число учитываемых спектральных линий и выбрать вид используемой оконной функции.
9. Предложен комплексный алгоритм СВМ, позволяющий по единой базе отсчетов оценить частоту и СКЗ гармонического сигнала.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов определения отклонения частоты гармонического сигнала в системах встроенного контроля:

1. Предложено и доказано, что методику оценки начального момента случайной величины с выбором его порядка можно использовать для определения центра тяжести спектра и созданы программные средства оценки методической погрешности определения частоты по дискретным отсчетам.
2. Разработан алгоритм определения положения центра спектра «Спектрально-весовым методом» по двум наибольшим составляющим спектра для окна Кайзера ($\beta=2$), вносящий меньшие методические погрешности, чем известные алгоритмы Ли и Джайна.
3. Разработан алгоритм определения положения центра спектра путем интерполяции по трем компонентам алгоритм «Предлагаемый» для окна Блекман-Харриса, вносящий меньшие методические погрешности, чем известные алгоритмы Якобсена, Динга и Воглеведе.

Практическая значимость работы включает библиотеку возможностей и рекомендаций по применению метода моментов для оценки отклонения частоты гармонического сигнала в различных устройствах и системах телекоммуникаций.

1. Разработана инженерная программа моделирования СВМ, которая позволяет на этапе проектирования оценить и выбрать параметры виртуального измерителя отклонения частоты: вид оконной функции; число учитываемых спектральных линий; число отсчетов; порядок начального момента и др.
2. Моделирование позволило сравнить методические погрешности различных интерполяций для двух и трех спектральных линий. Лучшие значения получены для адаптированного «спектрально-весового метода» и модернизированного «Предлагаемого».

3. Моделирование показало, что универсальным является окно Кайзера:

- Вносящее минимальные значения МСП (от $1e-1$ до $1e-13$) в широком диапазоне требований в рамках различных задач,
- При ОСШ 30 (дБ) для 16 отсчетов и 3-х компонент возникает МСП на уровне 10^{-3} для 512 отсчетов и 5-и компонент - МСП на уровне 10^{-7} .
- Графики МСП имеют пологие близкие к нулевому уровню зоны рабочих частот сигнала, в которых можно на порядок снизить МСП.

Степень достоверности полученных результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подведена публикациями на научных конференциях, а также результатами компьютерного моделирования, демонстрирующими эффективность предложенных алгоритмов и методик определения отклонения частоты гармонического сигнала.

Результаты работы внедрены на кафедре Радиотехники и радиосистем ВлГУ в учебный процесс по дисциплине «Встраиваемые системы контроля РЭС», а также в учебный процесс Технического университета Аль-Фурат Аль-Аусат и будут использоваться студентами Технического института Наджафа, факультета коммуникационных технологий Ирака.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработан алгоритм, названный «Предлагаемый», определения положения центра спектра путем интерполяции, снижающий более, чем на порядок МСП по сравнению с алгоритмами Якобсена, Динга и Воглеведе.
2. Предложена методика оценки начального момента случайной величины для определения центра тяжести спектра в задаче нахождения отклонения частоты гармонического сигнала, уменьшающая погрешность от 4 до 10 раз по сравнению с алгоритмами Джайна и Ли.
3. Разработана компьютерная программа моделирования, которая позволяет на этапе проектирования оценить и выбрать параметры виртуального измерителя отклонения частоты в диапазоне значений методической погрешности от 10^{-1} до 10^{-8} для разного отношения С/Ш с усреднением.
4. Предложена методика уменьшения скачка погрешности до 40 раз путем перехода от нечетной к четной структуре спектра для повышения точности оценки частоты.

Апробация работы. Результаты работы автором докладывались и обсуждались на конференциях:

1. «4th International Conference on Pure Sciences (ICPS)», Baghdad-IRAQ-2023 (Scopus).
2. «3rd International Conference on Engineering & Science (ICES)», Al-SAMAWA - IRAQ, AIP Publishing, 2023 (Scopus).
3. «Молодежная научно-практическая конференция по Математическому моделированию и Информационным Технологиям (СМИТ)», Секция цифровая обработка сигналов и машинное обучение - Казань- Россия, 2022.
4. Международная научно-практическая конференция, «МНК-350», секция 4, Актуальные проблемы науки и техники, Уфа- Россия, 2023.
5. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Научное и техническое творчество молодежи», Новосибирск- Россия, 2023 г.
6. XV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», Владимир-Суздаль, Россия, 2022.
7. XIV Международная научно-техническая конференция «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ, Владимир, Россия - 2021».

Публикации по работе. По материалам диссертаций опубликовано 25 работ; из них 6 докладов на международных конференциях (три доклада в журнале AIP Conf., индексируемом SCOPUS), одна статья в региональном журнале в Ираке и 11 статей в журналах, рекомендованных ВАК; получены четыре свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 4 главы, введения, заключения, 65 рисунков, 136 страниц, из них основного текста 111 страницы, 17 таблиц, библиографии из 102 наименований и 8 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы основные проблемы, приведены цели и задачи исследования, определены объект и предмет исследований, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов, определены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются алгоритмические интерполяционные методы измерения отклонения частоты гармонического сигнала, определены

задачи и предмет исследования. Проведен анализ влияния метода интерполяции на погрешность оценки частоты дискретизированного гармонического сигнала, исследованы алгоритмы интерполяции по двум и трем спектральным линиям (Джайна, Ли, Якобсена, Динга, Воглеведе).

Разработан алгоритм интерполяции, названный «Предлагаемый», в котором положение максимума энергетического спектра сигнала оценивается по 3-м самым большим спектральным линиям $U(n)$, $U(n+1)$ и $U(n-1)$, (см. рис. 1).

Алгоритм «Предлагаемый»

Вводятся исходные параметры: диапазон частот сигнала F_c , частота дискретизации F_d , вид окна, отношение С/Ш (дБ) и др. Выполняются следующие шаги алгоритма оценки частоты методом интерполяции:

1. Формируется массива данных из N дискретных отсчетов сигнала, где $N = 2m$, $m = 4...13$.
2. Накладывается оконная функция $Win(n)$, $R(n) = x(n) \times Win(n)$.
3. Выполняется БПФ.
4. По комплексному спектру находятся номер и значение отсчета с максимальным уровнем U_n , где n номер спектральной линии, амплитуда которой наибольшая.
5. Определяются уровни отсчетов, ближайших к максимальной оставляющей:

$$U(n-1) \text{ и } U(n+1).$$

6. Оценивается величина смещения (δ) максимума энергии спектра:

$$\delta = \frac{|U(n) - U(n-1)| - |U(n) - U(n+1)|}{U(n)} \quad (1)$$

7. Рассчитывается частота сигнала: $F_{est} = (n + \delta) * \frac{F_d}{N}$.

8. Рассчитывается относительная погрешность: $E_{est} = \left| \left(\frac{F_{est} - F_c}{F_c} \right) \right|$,

где F_{est} - измеренное значение частоты, F_c - истинное значение частоты.

Модернизированный алгоритм СВМ

Предложено использовать методику оценки начального момента случайной величины с выбором его порядка для определения центра тяжести спектра в задаче нахождения отклонения частоты гармонического сигнала. Главными достоинствами СВМ являются широкие возможности выбора вариантов обработки, отличающиеся числом учитываемых составляющих спектра от 1 до $N/2$, числом периодов сигнала, числом отсчетов. Это создает условия

оптимизированного выбора конфигурации для конкретных требований точности и быстродействия.

Принимается модель равенства частоты сигнала значению абсциссы «центра тяжести», которая для дискретной функции и нечетного числа учитываемых спектральных линий может быть представлена в виде формулы:

$$f_c \approx \frac{\sum_{i=n-d}^{n+d} |S_i[i \cdot F_d / N]|^p \cdot i \cdot F_d / N}{\sum_{i=n-d}^{n+d} |S_i[i \cdot F_d / N]|^p}, \quad (2)$$

где d – число дополнительных линий спектра близких к n сверху и снизу; p – порядок, определяющий физический смысл «центра тяжести»; S_i амплитуды соответствующих спектральных компонент; i – значение номера учитываемой спектральной составляющей.

В настоящее время нет достаточных данных по исследованию влияния порядка начального момента, по выбору оконной функции, числа отсчетов и учитываемых спектральных линий.

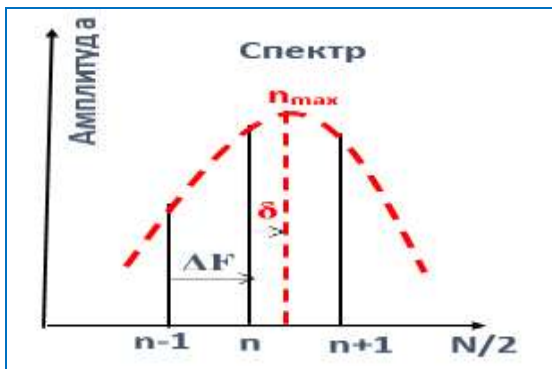


Рисунок 1. Спектр ДПФ

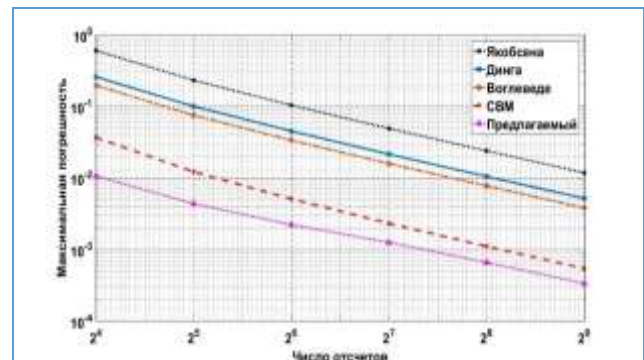


Рисунок 2. МСП для 3-х линий

На рис. 2 представлены графики МСП для 5 видов алгоритмов с использованием окна Блэкмана-Харриса. Графики, построенные для 16, 32, 64, 128, 256 и 512 отсчетов и 3-х спектральных линий, показывают, что более низкие значения МСП вносит «Предлагаемый» алгоритм, а алгоритм Якобсена - наибольшие. В табл. 1 представлены МСП в зависимости от числа отсчетов, для окна Блэкмана-Харриса и трех спектральных линий. При использовании «Предлагаемого» алгоритма - МСП снижена на порядок.

Разработан алгоритм СВМ, который при расчетах по 2-м спектральным линиям для окон Кайзера ($\beta=2$) позволяет уменьшить МСП до 10 раз, графики

зависимости МСП от объема выборки показывают, что при числе отсчетов от 16 до 512 СВМ МСП ниже чем Джайна и Ли (см. рис. 3).

Таблица 1. МСП для трех спектральных линий и окна Блэкмана-Харриса

Алгоритм	Методическая погрешность при числе отсчетов					
	16	32	64	128	256	512
Якобсена	3.03e-1	1.43e-1	1.03e-1	8.33e-2	4.63e-2	2.25e-2
Динга	2.07e-1	9.99e-2	4.50e-2	2.14e-2	1.04e-2	5.17e-3
Воглеведе	1.95e-1	7.48e-2	3.34e-2	1.58e-2	7.72e-3	3.81e-3
СВМ	2.57e-2	1.19e-2	5.77e-3	2.83e-3	1.43e-3	7.05e-4
Предлагаемый	1.06e-2	3.15e-3	2.22e-3	1.25e-3	6.60e-4	3.35e-4

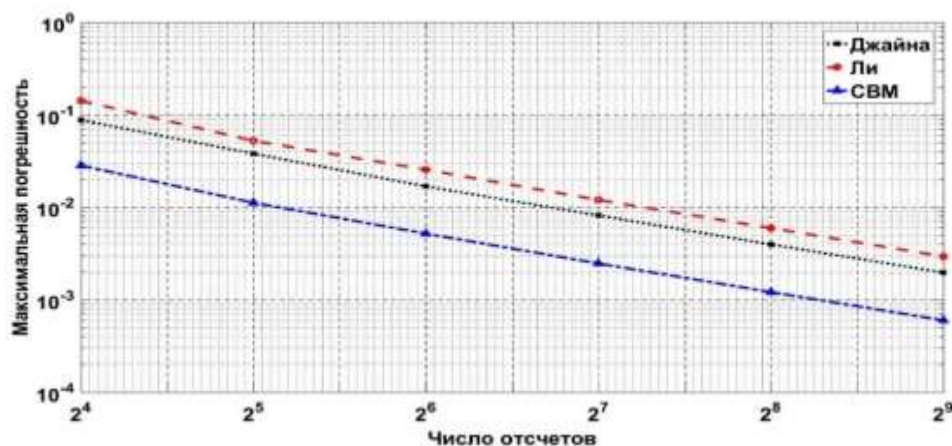


Рисунок 3. МСП для окна Кайзера ($\beta=2$)

В табл. 2 представлены значения МСП в зависимости от числа отсчетов, для окна Кайзера ($\beta=2$) и двух спектральных линий. Меньшие значения погрешности получаются для СВМ, МСП которого снижены на порядок.

Таблица 2. МСП для двух спектральных линий и окна Кайзера ($\beta=2$)

Алгоритм	МСП при числе отсчетов					
	16	32	64	128	256	512
Джайна	4.3e-1	1.5e-1	5.8e-2	2.5e-2	1.2e-2	5.9e-3
Ли	2.1e-1	7.5e-2	2.4e-2	9.4e-3	4.2e-3	1.9e-3
СВМ	2.1e-2	1.3e-2	6.5e-3	3.2e-3	1.6e-3	6.9e-4

Во второй главе разработаны алгоритмы оценки отклонения частоты гармонического сигнала спектрально-весовым методом (модернизированный алгоритм). Исследованы достоинства применения СВМ для измерения частоты гармонического сигнала. Предложена методика устранения скачка погрешности

путем перехода от нечетной к четной структуре спектра для повышения точности оценки частоты:

1. Выбор параметров: частоты дискретизации F_d , минимальной и максимальной частоты сигнала F_c , порядка начального момента, отношения С/Ш, временного окна, количества N выборок сигнала и количества спектральных линий и определение четных и нечетных переходов.
2. Формирование массива из N дискретных отсчетов сигнала.
3. Применение временного окна к массиву отсчетов.
4. Вычисление комплексного спектра с помощью прямого преобразования Фурье.
5. Определение номера компоненты (n) с максимальной амплитудой в комплексном спектре.
6. Оценка уровня компонент, ближайших к максимальной, и выбор алгоритма взвешивания для четного или нечетного числа линий спектра.
7. Вычисление частоты сигнала (формула 2 и 3) в заданном диапазоне значений в зависимости от четности/нечетности числа линий спектра:

$n-d \dots n+d$ для нечетного числа линий спектра;

$n-d \dots n+d+1$ для четного числа линий спектра (добавка сверху);

$n-d-1 \dots n+d$ для четного числа линий спектра (добавка снизу).

$$f_c \approx \frac{\sum_{i=n-d}^{n+d+1} |S_i[i \cdot F_d / N]|^p \cdot i \cdot F_d / N}{\sum_{i=n-d}^{n+d+1} |S_i[i \cdot F_d / N]|^p}, \quad (3)$$

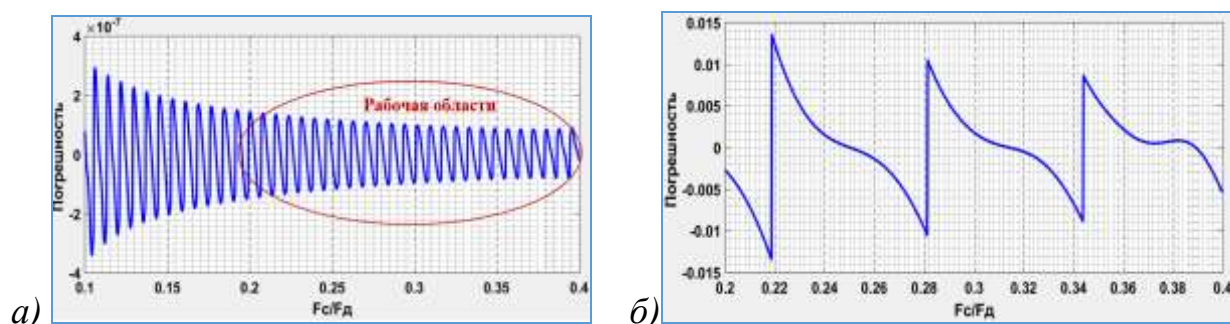


Рисунок 4. МСП для окна Ханна, при 128 (а) и 16 (б) дискретных отсчетов

Типичный график отклонения частоты, приведенный на рис. 4а и 4б, имеет колебательный вид, снижающийся по амплитуде с ростом частоты сигнала. Это означает, что следует приближать частоту дискретизации к границе минимальной

частоты дискретизации по Котельникову. Чем меньше отсчетов, тем выше погрешности и меньше выбросов в рабочей полосе частот сигнала.

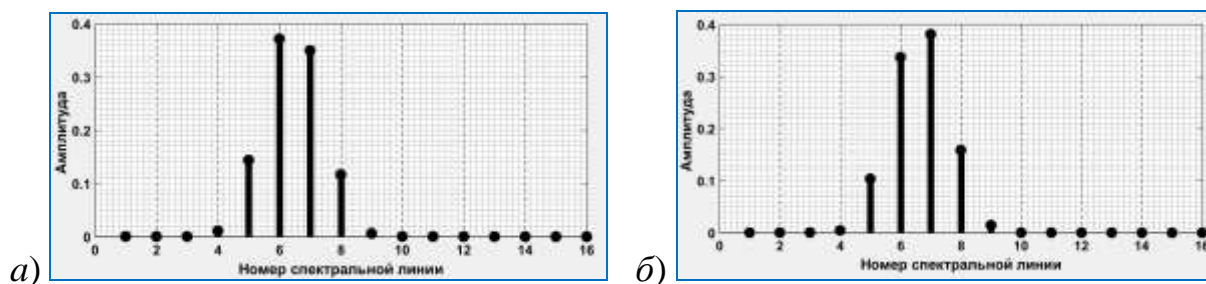


Рисунок 5. Симметрия четной структуры спектральных линий

На основании четной симметрии спектра (см. рис. 5а и 5б), когда две максимальные компоненты спектра близки, в области перехода максимума от одной компоненты к другой возникает разрыв (скачок погрешности) как показано на рис. 6. Моделирование показало, что для спектра с четной симметрией необходимо добавить дополнительную компоненту и учитывать четное число спектральных линий. На рис. 5а показано, что для $d=1$ к трем компонентам с номерами 5, 6, и 7 следует добавить компоненту 8. Для спектра, приведенного на рис. 5б, к трем компонентам с номерами 6, 7 и 8 следует добавить компоненту 5.

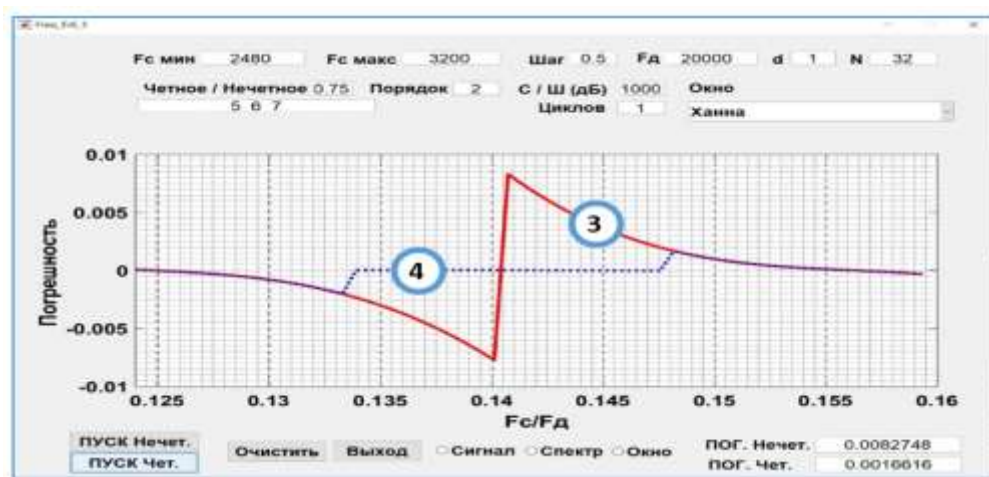
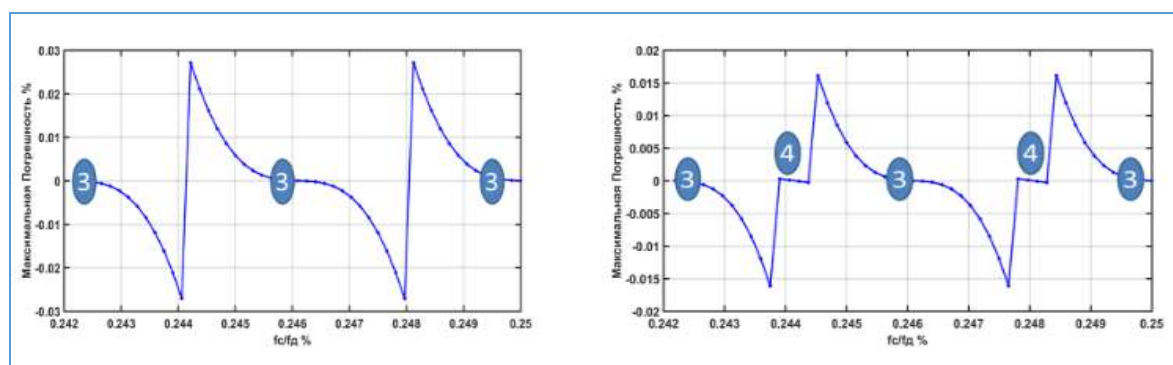


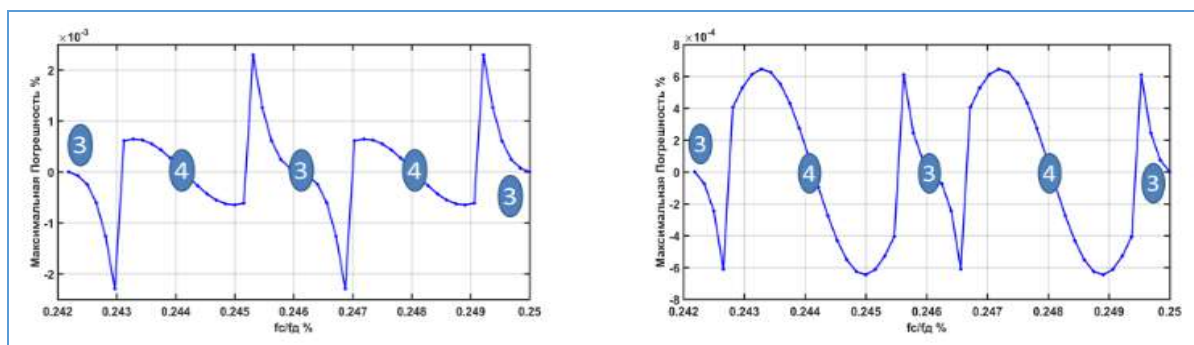
Рисунок 6. Уменьшение погрешности в зонах скачка

На рис. 6 показаны графики погрешностей при вычислении частоты и учете только трех, а также трех и четырех спектральных линий. Переход вычислений по четырем спектральным линиям позволяет снизить МСП с 0,008 до 0,001, т.е. кратно в 8 раз.



а) только 3 компоненты

б) 4 компоненты в зоне 0,9



в) 4 компоненты в зоне 0,7

г) 4 компоненты в зоне 0,6

Рисунок 7. Графики МСП при переходе от 3-х до 4-х спектральных линий

Подключение четвертой компоненты с коэффициентом близости 90% снижает максимальную МСП оценки частоты до $1.7e-4$ (см. рис 7б). При уменьшении коэффициента близости с подключением четвертой компоненты зона нечетной структуры уменьшается. Если подключение на уровне 70%, то МСП оценки частоты снижается до $2.4e-5$ (см. рис 7в). Если подключение на уровне 60%, то МСП оценки частоты снижается до $6.4e-6$ (см. рис 7г). Максимальное снижение МСП более 40 раз.

В третьей главе представлены результаты моделирования СВМ. Исследовано влияние вида окна, объема выборки и числа учитываемых спектральных линий на оценку частоты гармонического сигнала. Рекомендовано применение окна Кайзера для определения частоты гармонического сигнала СВМ. Рассмотрено влияние аддитивного шума и порядка начального момента на МСП. Проведены исследования влияния вида окна при $N=512$.

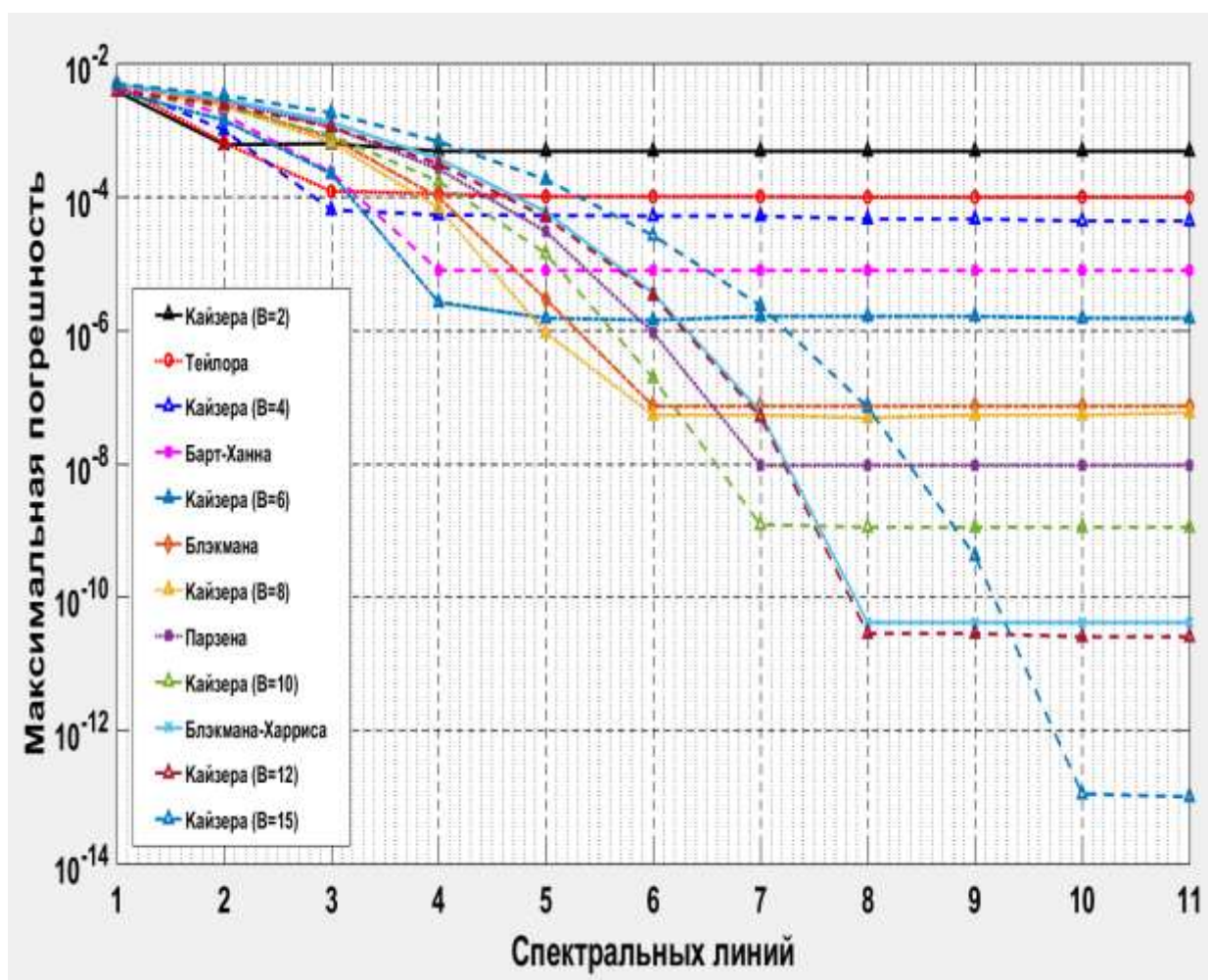


Рисунок 8. Графики максимальная МСП для $N=512$ и разных окон

Моделирование показало, что окно Кайзера при разных значениях параметра β может обеспечить минимальную методическую погрешность для разного количества учитываемых спектральных линий. С ростом числа компонент спектра погрешности снижаются, доходят до минимума и далее остаются постоянными.

При 10 и большем числе компонент спектра окно Кайзера ($\beta=15$) вносит МСП на уровне 10^{-13} (см. рис. 8). На рис. показано, что окно Кайзера вносит наименьшие МСП и может считаться универсальным при правильном выборе параметра β : для 1 и 2 спектральных линий $\beta=2$; для 3 спектральных линий $\beta=4$; для 4 спектральных линий $\beta=6$; для 5 и 6 спектральных линий $\beta=8$; для 7 спектральных линий $\beta=10$; для 8 и 9 спектральных линий $\beta=12$; для 10 спектральных линий $\beta=15$.

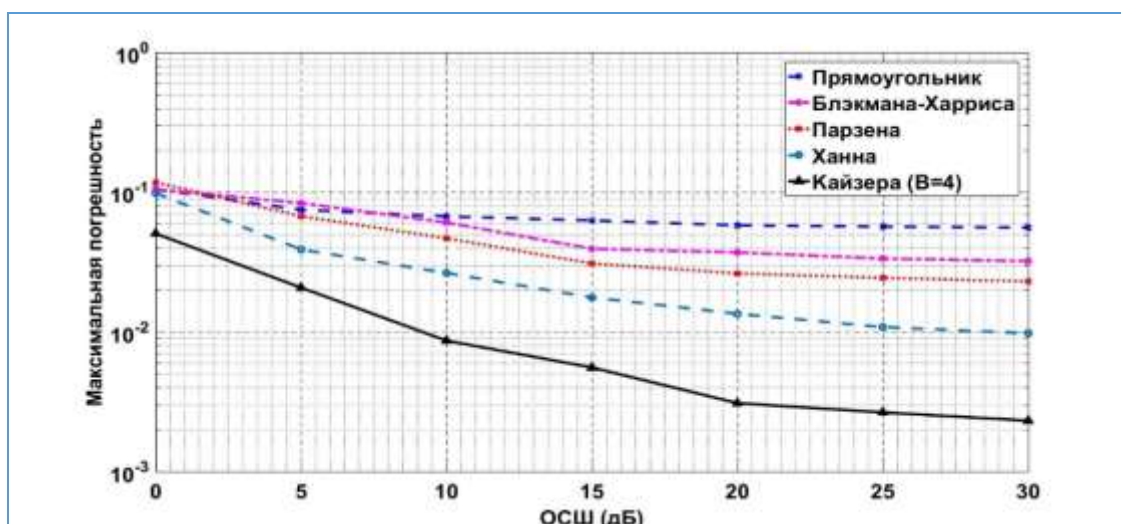


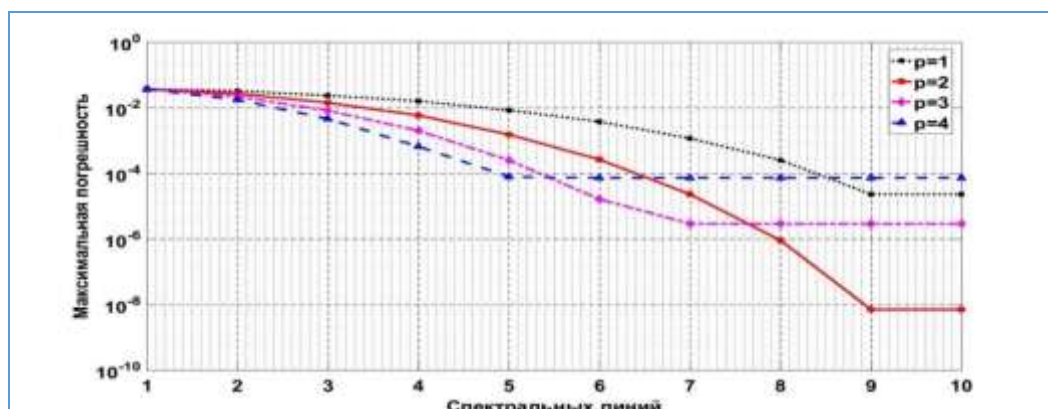
Рисунок 9. Графики МСП для 16 отсчетов и 5 видов окон

Графики МСП для различных оконных функций и 3-х спектральных линий с отношением сигнал/шум 0–30 дБ и 16 выборками показывают, что окно Кайзера ($\beta=4$) обеспечивает наименьшие МСП (см. рис. 9).

Таблица 3. МСП для пяти спектральных линий при числе ОСШ 30 дБ

Окно	МСП	Окно	МСП	Окно	МСП
Кайзера ($\beta=8$)	$5.9e-7$	Барт-Ханна	$5.7e-6$	Тьюки	$7.3e-5$
Блэкмана-Харриса	$4.0e-5$	Гаусса	$1.0e-5$	Плоская вершина	$1.0e-6$
Натталла	$3.4e-5$	Прямоугольное	$1.1e-3$	Чебышева	$2.7e-5$
Парзена	$2.0e-5$	Ханна	$6.3e-6$	Треугольное	$1.4e-5$
Бомана	$3.0e-6$	Блэкмана	$1.7e-5$	Бартлетта	$3.3e-3$
Синусоидальное	$2.1e-4$	Хэмминга	$6.3e-4$	Тейлора	$7.0e-5$

В табл. 3 приведены значения максимальной МСП для 18 окон, 5 компонент спектра и 64 отсчетов. Полученные данные показывают, что окно Кайзера ($\beta=8$) вносит погрешности $5.9e-7$, МСП которого снижены на порядок в диапазоне отношения сигнал-шум 30 дБ.

Рисунок 10. МСП для $N=64$ и окна Кайзера ($\beta=15$)

Разработан алгоритм оценки частоты гармонического сигнала и выбора порядка начального момента спектральным методом (см. рис. 10).

Для окна Кайзера ($\beta=15$) **четвертая** степень является лучшей до 5 спектральных линий, и **третья** степень является лучше для 6 и 7 спектральных линий, а **вторая** степень - при 8 и более спектральных линий.

В четвертой главе представлена компьютерная программа имитационного полунатурного моделирования СВМ и рассмотрены перспективы развития. Рассмотрен комплексный алгоритм, который позволяет оптимизировать вычислительные затраты на измерение первичных параметров, частоты и среднеквадратического значения спектральных линий и гармоник сигнала.

Графики методических погрешностей оценки СКЗ и частоты гармонического сигнала для 64 отсчетов и окна Кайзера ($\beta=10$) при 7 учитываемых спектральных линий приведены на рис. 11. Моделирование показало, что для трех спектральных линий МСП составляют 10^{-3} , для 5 спектральных линий МСП уменьшаются до 10^{-5} и для 7 спектральных линий МСП оценки частоты и СКЗ не превышают 10^{-7} . При контроле и мониторинге сигнала в узкой полосе частот можно дополнительно уменьшить методическую погрешность оценки СКЗ и частоты, работая в зонах 1 и 2 (см. рис. 11).

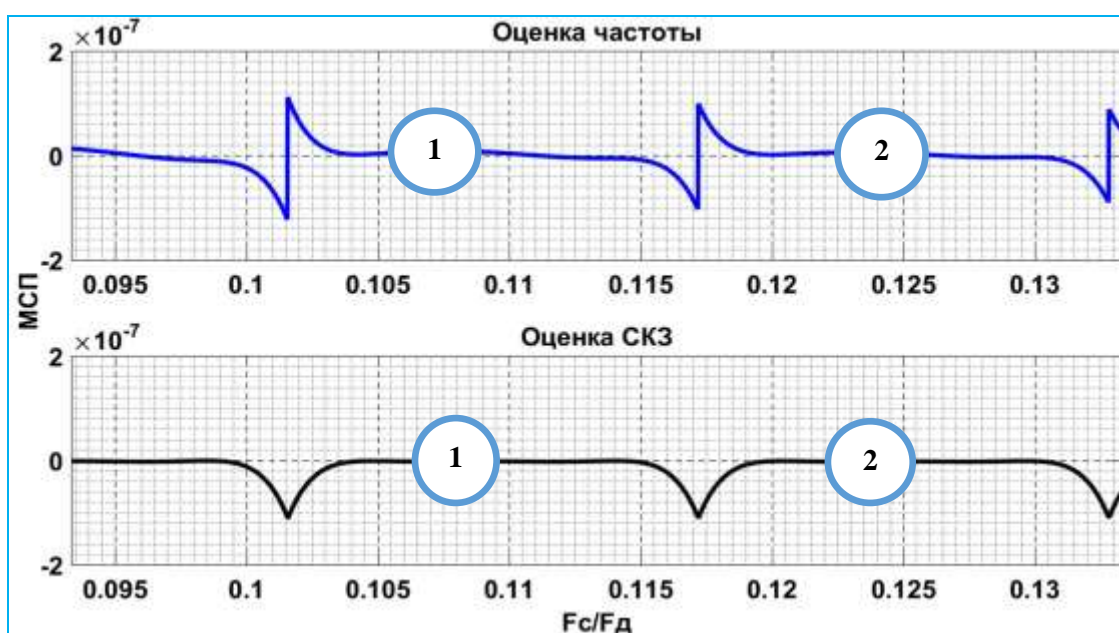


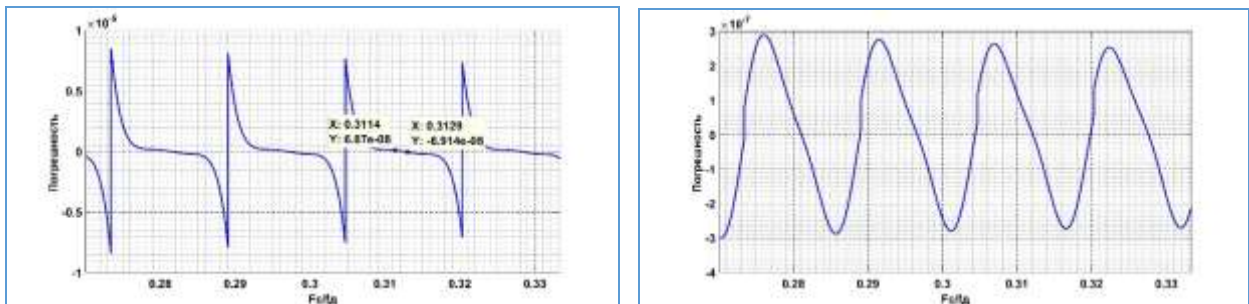
Рисунок 11. МСП оценки по 7 спектральным линиям

Приведем в качестве примера методику оптимизированного выбора и мониторинга радиовещательной сети каналов Ирака с реализацией ежедневного и ежеминутного контроля отклонения рабочих частот от выделенных значений в каждом канале. Выбираем $F_{д}=3*F_{сmax}=324$ МГц, начальный момент 3-ого и 4-ого порядка, отношение С/Ш 30 дБ, временное окно Кайзера ($\beta=8$), число N отсчетов сигнала 64, количество учитываемых спектральных линий 5 и 7.

Проводим проверку и оценку реализуемости выбранных параметров путем работы с программой моделирования:

1. В широкой полосе (см. рис. 12б) $F_c=87.5\dots 108$ МГц, 205 каналов с полосой 0,1 МГц МСП на уровне $2e-7$, количество учитываемых спектральных линий 7, число периодов от 17.3 до 21.3.
2. В узкой полосе (см. рис. 12а) $F_c=100.8\dots 101.3$ МГц, 5 каналов с полосой 0,1 МГц, кратковременная нестабильность ($4e-8$), количество учитываемых спектральных линий 5.

Моделирование показало, что отношение частоты сигнала к частоте дискретизации $F_c/F_{д}$ находится в пределах 0,2701-0,3331 при количестве периодов $F_c/F_{д} * N$.



а) 5 спектральных линий

б) 7 спектральных линий

Рисунок 12. График относительно погрешность для окна Кайзера ($\beta=8$)

В результат моделирования предложено два решения: для широкой и узкой полосы рабочих частот.

Приведена методика выбора базовые и вторичные параметров.

Последовательность шагов и анализ базовых требований:

1. В соответствии с полосой рабочих частот сигнала выбираются доступные значения частоты дискретизации для получения заданного отношения $F_c/F_{д}$.
2. С учетом необходимой точности выбирается число учитываемых спектральных линий, вид оконной функции и число отсчетов.

3. Максимальное число спектральных линий сетки частот БПФ зависит от числа отсчетов. Диапазон рабочих частот сигнала определяется возможностями перестройке использована спектра, число отсчетов ограничивает разрешение по частоте.
4. При частоте дискретизации 621 МГц и полосы частот сигнала 151,7125 - 154,0125 МГц с шагом 25 кГц можно использовать в сфере железнодорожного транспорта.



Рисунок 13. Относительная погрешность для окна Кайзера ($\beta=8$)

Моделирование показало, что при частоте дискретизации 621 МГц для окна Кайзера ($\beta=8$), 5 компонент и 256 отсчетов МСП находится на уровне 10^{-8} в диапазоне F_c/F_d от 0.2445 до 0.2480 (смотри рис. 13).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлена разработка и исследование алгоритмов оценки отклонения частоты гармонического сигнала спектрально-весовым методом в системах встроенного контроля:

1. Предложено методику оценки начального момента случайной величины с выбором его порядка использовать для определения центра тяжести спектра в задаче нахождения отклонения частоты гармонического сигнала. Правильный выбор порядка позволяет снизить методическую погрешность в несколько раз.

2. Разработанные алгоритмы и программные средства определения частоты по дискретным отсчетам позволяют путем учета четного или нечетного числа линий спектра уменьшить методическую погрешность, в несколько раз.
3. Разработаны два базовых алгоритмов спектрально-весаого метода (для окна Кайзера) и «Предлагаемого» (для окна Блекман-Харриса). Созданные программные средства моделирования позволяют оптимизировать выбор вида оконной функции, число отсчетов, порядок начального момента, отношения частот сигнала и дискретизации, четного или нечетного числа линий спектра.
4. Моделирование показало, что в широком диапазоне требований к точности в рамках различных задач универсальным является окно Кайзера, вносящее минимальные МСП:
 - При ОСШ 30 (дБ) 16 отсчетах и 3 компонент МСП на уровне 10^{-3} ;
 - При ОСШ 30 (дБ) 16 отсчетах и 5 компонент МСП на уровне 10^{-5} ;
 - При ОСШ 30 (дБ) 64 отсчетах и 5 компонент МСП на уровне 10^{-7} ;
 - Графики МСП имеют пологие близкие к нулевому уровню зоны рабочих частот сигнала, в которых можно на порядок снизить МСП.
5. Приведенные примеры работы с программой показывают широкие возможности проектирования систем оценки отклонения частоты. Созданы программы и средства, позволяющие оптимизировать алгоритм обработки для конкретных случаев.
6. Предложен комплексный алгоритм СВМ, позволяющий по единой базе отсчетов оценить частоту и СКЗ гармонического сигнала. В перспективе предполагается расширение перечня измеряемых параметров сигналов и устройств по единой базе дискретных отсчетов.

В Приложениях представлены результаты экспериментов, диплом за лучшую научную работу года на конференции «Вестник науки-2023», сертификаты участия в конференции «ICES-2023», индексируемом Scopus, акты внедрения, программы моделирования Matlab для методов СВМ и «Предлагаемого» алгоритма.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Альрубеи М. А.** Комплексный алгоритм оценки уровня и частоты гармонического сигнала на базе преобразования Фурье / М. А. Альрубеи // Проектирование и технология электронных средств, 2023, №2, – С. 43-47.
2. **Альрубеи М. А.** Сравнительный анализ способов интерполяции при оценке частоты дискретизированного гармонического сигнала / Альрубеи М. А. // Труды МАИ, 2023. № 130.
3. **Альрубеи М. А.** A new algorithm for improving accuracy and reducing complexity of measuring the frequency of periodic signals/ Альрубеи М. А. // I-methods, 2023, Т 15, № 1.
4. **Альрубеи М. А.** Определение частоты дискретизированного гармонического сигнала по положению энергетического пика спектра / М. А. Альрубеи, А. Д. Поздняков // Проектирование и технология электронных средств. – 2022. – № 2, – С. 30-34.
5. **Альрубеи М. А.** Влияние окна Кайзера на погрешность определения частоты гармонического сигнала методом моментов / М. А. Альрубеи, А. Д. Поздняков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2023. – № 2(50). – С. 14-20. – DOI 10.24412/2221-2574-2023-2-14-20.
6. **Альрубеи А. М.** Оценка частоты при симметричной и несимметричной структуре спектральных компонент дискретизированного гармонического сигнала / А. М. Альрубеи, А. Д. Поздняков // Труды МАИ. – 2023. – № 129. – DOI 10.34759/trd-2023-129-15.
7. **Альрубеи М. А.** Погрешности определения частоты гармонического сигнала методом моментов по пику энергетического спектра дискретных отсчетов / М. А. Альрубеи, А.Д. Поздняков // Проектирование и технология электронных средств, 2023, №1, - С. 54-57.
8. **Альрубеи М. А.** Влияние шума на погрешность измерения частоты по дискретным отсчетам гармонического сигнала методом моментов / М. А. Альрубеи, А. Д. Поздняков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 4, – С. 94-102. – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.4.012.
9. **Поздняков А.Д.** Восстановление повторяющейся последовательности импульсов в канале передачи данных при когерентном стробировании/ М. А. Альрубеи, А.А. Калюжный, А.Д. Поздняков // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2022, №1, - С. 29-36.
10. **Поздняков А.Д.** Восстановление периодического сигнала по заданному числу точек когерентного стробирования / А.Д. Поздняков, А.А. Калюжный, А. Р. Мохаммед // Известия института инженерной физики учредители, 2021, №3, -С. 39-43.

11. **Поздняков А.Д.** Восстановление периодического сигнала при заданном числе точек стробирования / А.А. Калюжный, А. Р. Мохаммед, А.Д. Поздняков // Проектирование и технология электронных средств, 2022, №1, -С. 53-57.

Публикации в изданиях, входящих в Scopus

12. **Alrubei Mohammed Abdalabbas** Influence of the window function and Interpolation algorithms on the accuracy of estimating the frequency of the periodic signal, / Alrubei Mohammed Abdalabbas, Sarab AL-Chlaihawi, Pozdnyakov Alexander Dmitrievich // AIP Conf. Proc. 2024, 3051, 080001, <https://doi.org/10.1063/5.0191862>
13. **Alrubei M. A.** Improving the accuracy of the frequency measurement by the spectral method, Alrubei Mohammed Abdalabbas; Sarab AL-Chlaihawi; Pozdnyakov Alexander Dmitrievich, AIP Conf. Proc., 2024, 3051, 060001 <https://doi.org/10.1063/5.0191860>
14. **Mohammed A. T. Alrubei.** A new accurate estimator of the frequency using the three-point interpolation of DFT samples, Mohammed A. T. Alrubei; Sarab AL-Chlaihawi; A. D. Pozdnyakov, Mohammed Al-Saadi AIP Conf. Proc., 2024, 3036, 030004 <https://doi.org/10.1063/5.0199481>

Публикации в прочих изданиях

15. **Альрубеи М. А.** Влияние алгоритмов интерполяции на точность оценки частоты выбранного гармонического сигнала / Альрубеи М. А., // Международная научно-практическая конференция. Уфа, 10 февраля 2023, номер МНК-350, секция 4 актуальные проблемы науки и техники : Изд.-Общество с ограниченной ответственностью "Научно-издательский центр "Вестник науки" (Уфа), 2023, – С. 38-45.
16. **Альрубеи М. А.** Сравнительный анализ влияния оконной функции на оценку частоты дискретизированного гармонического сигнала / М. А. Альрубеи // Актуальные проблемы науки и техники: Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции. В 2 ч., Уфа, 10 февраля 2023 года. Том Часть 1. – Уфа: "Научно-издательский центр "Вестник науки", 2023. – С. 46-52.
17. **Альрубеи М. А.** Измерение частоты гармонического сигнала по ограниченному числу дискретных отсчетов методом моментов / М. А. Альрубеи // Современные проблемы телекоммуникаций: Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Новосибирск, 19–20 апреля 2023– Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2023. – С. 370-373. – DOI 10.55648/978-5-91434-084-8-2023-262-267.
18. **Альрубеи М. А.** Измерение частоты по нескольким периодам сигнала методом нахождения центра тяжести спектра / М. А. Альрубеи, А. Д. Поздняков // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии: ФРЭМЭ'2022, Владимир-Суздаль, 28–30 июня 2022 года. – Владимир-Суздаль: ООО "Графика", 2022. – С. 173-176.

19. **Mohammed A. T. Alrubei**, An approach for single-tone frequency estimation using DFT interpolation with parzen windowing/ Alrubei Mohammed A. T., Pozdnyakov Alexander Dmitrievich, // Kufa Journal of Engineering, vol. 14, no. 3, Aug. 2023, pp. 93-104.
20. **Поздняков А. Д.** Восстановление периодического сигнала в расширенном диапазоне частот когерентного стробирования / А. Д. Поздняков, А. А. Калюжный, А. Р. Мохаммед // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 14-ой международной научно-технической конференции, Владимир, 06–07 октября 2021 года. – Владимир, 2021. – С. 148-151.
21. **Рукосуев А.С.** Комплекс виртуальных приборов для испытаний радиоприемника УКВ / Рукосуев А.С., **Мохаммед А.Р.**// Дни науки студентов, Изд.- Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 22 марта – 9 апреля 2021. – С. 252- 257.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

22. **Альрубеи М. А.**, Поздняков А.Д. Программа Влияние оконной функции на погрешность определения частоты гармонического сигнала методом Моментов. Свидетельство №2022616217, от 06- 04- 2022.
23. **Альрубеи М. А.**, Поздняков А.Д. Моделирование и оценка погрешности метода измерения частоты сигнала по максимуму энергетического спектра при наличии шумов. Свидетельство 2022684961, от 20- 10- 2022.
24. **Альрубеи М. А.**, Поздняков А.Д. Моделирование влияния числа учитываемых компонент спектра на величину погрешности при измерении частоты сигнала методом моментов. Свидетельство 2022685856, от 20- 10- 2022.
25. **Альрубеи М. А.**, Поздняков А.Д. Моделирование метода оценки частоты по положению энергетического пика спектра гармонического сигнала. Свидетельство №2022616218, от 06- 04- 2022.

Подписано в печать 24.06.2024 г.

Формат 60x84/16. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,4.

Тираж 100 экз. Заказ 2425.

«Типография на Растопчина»: 600027, г. Владимир, ул. Растопчина, 51,
ИП Кучина И.Н., e-mail: nik_poligraf@mail.ru