

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка программного анализатора спектра в среде NI DAQ Signal Accessory

УДК 004.424:621.317.757

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Козлов Виталий Петрович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Заревич Антон Иванович	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Муравьев Сергей Васильевич	д.т.н.		

**Планируемые результаты обучения по направлению
27.04.01 «Стандартизация и метрология»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен)
Профессиональные компетенции	
P1	Применять современные базовые и специальные естественнонаучные, математические и инженерные знания для решения комплексных задач метрологического обеспечения, контроля качества, технического регулирования и проверки соответствия с использованием существующих и новых технологий, и учитывать в своей деятельности экономические, экологические аспекты и вопросы энергосбережения
P2	Выполнять работы по метрологическому обеспечению и техническому контролю, определять номенклатуру измеряемых и контролируемых параметров, устанавливать оптимальные нормы точности и достоверности контроля, выбирать средства измерений и контроля, предварительно оценив экономическую эффективность техпроцессов, кроме того, уметь принимать организационно-управленческие решения на основе экономического анализа
P3	Выполнять работы в области стандартизации и сертификации: по созданию проектов стандартов, методических и нормативных материалов и технических документов, по нормоконтролю и экспертизе технической документации, участвовать в проведении сертификации продукции, услуг, систем качества и систем экологического управления предприятием, участвовать в аккредитации органов по сертификации, измерительных и испытательных лабораторий
P4	Выполнять работы в области контроля и управления качеством: участвовать в оперативной работе систем качества, анализировать оценку уровня брака и предлагать мероприятия по его предупреждению и устранению, участвовать в практическом освоении систем менеджмента качества
P5	Использовать базовые знания в области экономики, проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения комплексной инженерной деятельности; проводит анализ затрат на обеспечение требуемого качества и деятельности подразделения, проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектных решений
Универсальные компетенции	
P6	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности
P7	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, а также руководить командой, демонстрировать ответственность за результаты работы
P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной среде, разрабатывать документацию, представлять и защищать результаты инженерной деятельности
P9	Ориентироваться в вопросах безопасности и здравоохранения, юридических и исторических аспектах, а также различных влияниях инженерных решений на социальную и окружающую среду
P10	Следовать кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам инженерной деятельности

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники

Направление подготовки (специальность) 27.04.01 Стандартизация и метрология

Уровень образования магистратура

Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2019 /2020 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
11.11.2019	Знакомство с литературой по теме научной работы. Направления: - методы измерения спектров волновых сигналов; - спектральный анализ; - разложение в ряд Фурье, применение интеграла Фурье; - проектирование в среде LabVIEW	
01.12.2019	Изучение оборудования, методов расчета, программного обеспечения	
10.12.2019	Разработка Алгоритма вычисления спектра с использованием интеграла Фурье	
20.12.2019	Программная реализация алгоритма в среде LabVIEW	

01.03.2020	Разработка функционала спектрального анализа волнового сигнала	
15.04.2020	Проведение экспериментальных исследований программного анализатора спектра	
20.04.2020	Анализ, оформление результатов исследований	
01.05.2020	Подготовка раздела социальная ответственность	
10.05.2020	Подготовка раздела финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
20.05.2020	Подготовка раздела на иностранном языке языке	
01.06.2020	Оформление пояснительной записки	
08.06.2020	Подготовка доклада	

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Заревич Антон Иванович	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОАР ИШИТР	Муравьев Сергей Васильевич	д.т.н.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки 27.04.01 Стандартизация и метрология
 Отделение школы (НОЦ) Отделение автоматизации и робототехники

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
--

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ81	Козлов Виталий Петрович

Тема работы:

Разработка программного анализатора спектра в среде NI DAQ Signal Accessory	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 59-40/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект исследования – алгоритмы, реализующие функции спектрального анализа. Основная задача – разработка программного анализатора спектра, реализующего функции считывания сигнала, построения спектрограммы, определения численных характеристик спектра сигнала для применения в лабораторных исследованиях студентов
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	<ul style="list-style-type: none"> – математические основы построения спектра сигнала. – принципы работы, функциональные возможности анализаторов спектра. – алгоритмы реализации основных функций анализаторов спектра; – работа пакета LabVIEW с DAQ устройством; – виртуальные под-приборы, реализующие функционал анализа.

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - блок-схема алгоритма расчета спектра; - блок-схема алгоритма поиска гармоник; - блок-диаграмма разработанного программного анализатора спектра; - презентация магистерской диссертации.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП Конотопский Владимир Юрьевич
Социальная ответственность	Доцент ООД ШБИП Горбенко Михаил Владимирович

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Анализ спектра сигнал

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	24.02.2020
--	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Заревич Антон Иванович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Козлов Виталий Петрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ81	Козлов Виталий Петрович

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	27.04.01 Стандартизация и метрология

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<ul style="list-style-type: none"> - стоимость расходных материалов (880 руб.); - оклад исполнителей: научный руководитель (33 664 руб.), студент (15 470 руб.)
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	<ul style="list-style-type: none"> - отчисления во внебюджетные фонды (30,0 %); - НДС (20,0 %); - норма прибыли (15%).

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	<ul style="list-style-type: none"> - потенциальные потребители результатов исследования.
2. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	<ul style="list-style-type: none"> - организация и планирование научно-исследовательской работы; - определение трудоемкости выполнения работ; - разработка графика проведения научного исследования; - определение бюджета научно-технического исследования.
3. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	<ul style="list-style-type: none"> - оценка научно-технической эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. График проведения и бюджет НТИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	01.03.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Конотопский Владимир Юрьевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Козлов Виталий Петрович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
8ГМ81	Козлову Виталию Петровичу

Инженерная школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОАР
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	27.04.01 «Стандартизация и метрология»

Тема ВКР:

«Разработка программного анализатора спектра в среде NI DAQ Signal Accessory»	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Рабочая зона инженера-метролога представляет собой рабочий стол с персональным компьютером. Объектом исследования является программная реализация алгоритмов анализа спектра сигнала.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– ТК РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 24.04.2020) – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
2. Производственная безопасность: – Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения – Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	В качестве вредных факторов выделены: – недостаточная освещенность рабочей зоны; – повышенный уровень электро-магнитных излучений; – нервно-психические перегрузки.
3. Экологическая безопасность: – Анализ воздействия на окружающую среду.	Образование отходов при утилизации компьютера, мебели, люминесцентных ламп. Утилизация люминесцентных ламп производится согласно Постановлению Правительства РФ от 03.09.2010 N 681
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией техногенного характера являются пожар:

<ul style="list-style-type: none"> - перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<ul style="list-style-type: none"> - соблюдение правила техники безопасности при работе с электрооборудованием; - действия при возникновении пожара. <p>Санитарные правила в условиях эпидемиологической обстановки.</p>
---	--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.02.2020
---	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Горбенко Михаил Владимирович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Козлов Виталий Петрович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 123 страницы, 29 рисунков, 20 таблиц, 4 приложения.

Ключевые слова: анализ спектра, алгоритм, LabVIEW, DAQ, гармоника, амплитуда, интеграл, ряд, Фурье, сигнал.

Объектом исследования являются алгоритмы, реализующие функции спектрального анализа.

Цель работы изучение алгоритмов, реализующих построение спектра в анализаторах, выбор оптимального алгоритма и программная реализация в виртуальном приборе, с инструментами анализа построенного спектра.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики разработанного программного анализатора спектра:

- сбор, оцифровка сигнала через устройство NI USB 6251;
- диапазон частот входного сигнала от 1 до $5 \cdot 10^3$ Гц;
- максимальная амплитуда входного сигнала 5 В.

Область применения в лабораторных работах и исследованиях студентов НИ ТПУ.

В будущем планируется доработка ПО в части добавления анализа второго сигнала, с функционалом сравнения результирующих спектров. Оптимизация анализатора для повышения скорости функционирования, расширение частотного диапазона входного сигнала.

Работа представлена введением, пятью разделами (главами) и заключением, приведен список использованных источников.

Содержание

Определения	15
Обозначения и сокращения	16
Введение	17
1 Анализ спектра сигнала	21
1.1 Основы построения спектра сигнала	21
1.2 Структурные схемы анализаторов	24
1.2.1 Анализаторы спектра последовательного действия	24
1.2.2 Анализаторы спектра параллельного действия	28
1.2.3 Векторные анализаторы сигналов	29
1.2.4 Основные характеристики анализаторов	31
1.3 Обзор существующих программно-технических средств	34
1.3.1 Осциллограф АКТАКОМ АСК-2041	34
1.3.2 Анализатора спектра DSA	37
2 Виртуальный прибор «Анализатор спектра»	40
2.1 Техническое задание	40
2.2 NI USB 6251	40
2.3 Реализация ВП	44
2.3.1 Основной алгоритм расчета спектра сигнала	44
2.3.2 Реализация алгоритма в среде LabVIEW	46
2.4 Функционал ВП «Анализатор спектра»	47
2.4.1 Задача диапазона частот	49
2.4.2 Расчет гармоник	50
2.4.3 Расчет коэффициентов гармоник	52
3 Экспериментальная часть	54
3.1 Опробование	54
	12

3.2	Определение технических характеристик	56
3.2.1	Эксперимент № 1: Определение разрешения анализа в верхних граница диапазона	57
3.2.2	Эксперимент № 2: Определения спектра не периодических сигналов	61
3.2.3	Эксперимент № 3: Определение спектра последовательности прямоугольных импульсов	63
4	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	67
4.1	Потенциальные потребители результатов исследования	67
4.2	Организация и планирование научно-исследовательской работы	68
4.3	Определение трудоемкости выполнения работ	69
4.4	Разработка графика проведения научного исследования	70
4.5	Определение бюджета научно-технического исследования	74
4.5.1	Расчет материальных затрат научно-технического исследования	74
4.5.2	Расчет заработной платы основных исполнителей проекта	75
4.5.3	Расчет затрат на социальный налог	76
4.5.4	Расчет затрат на электроэнергию	77
4.5.5	Расчет амортизационных расходов	77
4.5.6	Расчет прочих расходов	78
4.5.7	Расчет общей себестоимости разработки	79
4.5.8	Расчет прибыли	79
4.5.9	Расчет НДС	79
4.5.10	Цена разработки НИР	79
4.6	Оценка научно-технической эффективности исследования	80
	Выводы по разделу	82
5	Социальная ответственность	84
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	84
5.1.1	Нормы трудового законодательства	84

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	86
5.2 Производственная безопасность	87
5.3 Анализ вредных производственных факторов	87
5.3.1 Отклонение показателей микроклимата	87
5.3.2 Повышенный уровень электромагнитных излучений	88
5.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	89
5.3.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений	93
5.3.5 Психофизиологические факторы	94
5.4 Анализ опасных факторов	94
5.5 Экологическая безопасность	96
5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	96
5.7 Предотвращение распространения эпидемий	98
Выводы по разделу	99
Заключение	101
Список использованных источников	102
Приложение А	107
Приложение Б	120
Приложение В	121
Приложение Г	122

Определения

средство измерения: Техническое средство, предназначенное для измерений

анализатор спектра: Устройство для визуализации и анализа спектра сигнала

мультиплексор: Устройство, имеющее несколько сигнальных входов, один или более управляющих входов и один выход

фильтр: Устройство для выделения желательных компонентов частотных составляющих сигнала

буфер: Промежуточное хранилище данных, предоставляемое программным обеспечением и предназначенное для накопления, переноса или копирования информации

виртуальный прибор: Программное приложение, создаваемое в среде LabVIEW

виртуальный под-прибор: Программное приложение, создаваемое в среде LabVIEW, предназначенное для реализации части функций основного приложения

меандр: Последовательность прямоугольных импульсов со скважностью 2

Обозначения и сокращения

ЭЛТ – электронно-лучевая трубка;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ПЧ – полоса частот;

АС – анализатор спектра;

РЛС – радиолокационная станция;

РЧ – радио частота;

СВЧ – сверхвысокочастотное излучение;

ПО – программное обеспечение;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ВП – виртуальный прибор;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

КГИ – коэффициент гармонических искажений;

КНИ – коэффициент нелинейных искажений;

НИИ – научно-исследовательский институт;

ВУЗ – высшее учебное заведение;

ВКР – выпускная квалификационная работа;

ЭМП - электромагнитное поле;

ПМП – постоянное магнитное поле;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

DSA – Dynamic Signal Analyzer;

DAQ – Data Acquisition;

NI – National Instruments;

USB – Universal Serial Bus.

Введение

Важное место в любой инженерной практике занимают измерения. Это также относится и к измерению параметров сигнала, как электрического так и радио. Распространенной измерительной задачей является наблюдение и анализ сигнала во временной и частотной областях. Временная составляющая сигнала анализируется с помощью осциллографов. Однако в ряде случаев измерения во временной области не обладает необходимой чувствительностью. Изменения сигнала могут быть растянуты во времени и физически не обнаружены на экране осциллографа. [1] Более чувствительной является спектральная форма сигнала. Измерения в частотной области возможны с помощью анализаторов спектра.

Анализатор спектра это прибор, определяющий распределение энергии колебаний по полосе частот. Области применения анализаторов спектра широко известны. К ним относятся как обработка сигналов в акустике, системах связи энергетике, так и верификация, кодирование информации и прочее. Использование преобразователей неэлектрических величин в электрические сигналы позволяет расширить применение анализаторов спектра на области медицины, ядерной энергетике и механики.

Спектр сигнала долгое время был лишь математической абстракцией. В начале девятнадцатого века французский физик и математик Жан-Батист Фурье теоретически доказал что периодическую функцию можно представить набором тригонометрических составляющих с собственным амплитудным значением для каждой составляющей. Их суммирование при бесконечном количестве идеально восстанавливает исходный сигнал. [11] В процессе развития радиоэлектроники высокоизбирательные радиоприемники позволили измерить гармонические составляющие. На этом принципе были основаны первые анализаторы спектра последовательного действия. Такой

подход имел жесткие ограничения обоснованные полосой пропускания фильтра, используемого для отсекающей частоты.

В реальном исследовании имеются ограничения не только по частоте, но и по возможному времени анализа. Таким образом, при исследовании мы получаем текущий спектр сигнала – результат преобразования Фурье с ограниченным верхним пределом по времени. Результирующая функция зависит как от частоты, так и от времени, что сближает исследования во временной и частотной областях.

В НИ ТПУ анализаторы спектра применяются, в частности, в лабораторных работах учебного процесса различных дисциплин. При компьютерных измерениях для анализа спектра используются программные анализаторы входящие в стандартный пакет набора виртуальных приборов LabVIEW, либо программно-аппаратного комплекса NI ELVIS. Оба решения основаны на алгоритмах БПФ, имеющие существенные ограничения. Стандартный виртуальный прибор только строит спектр, и не имеет инструментов анализа. Функционал прибора комплекса NI ELVIS существенно ограничен, и не соответствует возможностям реальных анализаторов. Таким образом, существует потребность в анализаторе спектра, дающего студентам полное представление о функционале реальных современных приборов, а так же корректно отображающего спектры как периодических так и не периодических сигналов, для знакомства студентов с типовыми паттернами спектральных составляющих сигнала.

Актуальность работы заключается в необходимости создания программного анализатора спектра с гибкими настройками анализа, базированного на имеющихся технических средствах, для применения в лабораторных работах при обучении студентов в НИ ТПУ.

Предмет исследования – спектральные методы анализа измерительных сигналов.

Объектом исследования являются – алгоритмы, реализующие функции спектрального анализа, практическая программная их реализация.

Целью данной работы является изучение алгоритмов, реализующих построение спектра в анализаторах, выбор оптимального алгоритма и программная реализация в виртуальном приборе с инструментами анализа построенного спектра.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- пользуясь литературными источниками изучить основы спектрального анализа измерительных сигналов;
- изучить принципы работы анализаторов спектра и систематизировать их функциональные возможности;
- реализовать алгоритм построения спектра электрического сигнала в среде LabVIEW;
- разработать программный анализатор спектра с функционалом получения численных характеристик;
- выполнить сравнение результатов работы разработанного виртуального прибора с необходимыми техническими характеристиками, а также с анализатором спектра в составе программно-аппаратной среды NI ELVIS.

Практическая значимость работы заключается в необходимости разработки виртуального анализатора спектра, реализующего основные возможности анализаторов спектра ведущих мировых производителей.

Авторский вклад автора заключается в подборе приборов, исследовании работы анализаторов спектра разных производителей, в сравнении функциональных возможностей анализаторов спектра, разработка алгоритмов анализа и реализация их в программном анализаторе спектра в среде LabVIEW.

При выполнении работы использовалось следующее оборудование, инструменты и программное обеспечение:

- персональный компьютер с операционной системой Microsoft Windows 7;
- офисное программное обеспечение MS Office (Visio, Word);
- программный пакет LabVIEW;
- DAQ устройство M серии NI USB 6251;
- литературный анализ научной литературы по теме.

1 Анализ спектра сигнала

Сигналы можно анализировать во временной области с помощью осциллографов и в частотной области с помощью анализаторов спектра. Два режима анализа связаны друг с другом с помощью преобразования Фурье, поэтому каждый сигнал, который изменяется во времени, имеет характерный частотный спектр.

1.1 Основы построения спектра сигнала

Приведем определение периодической функции:

$$f(t) = f(t + nT), \quad (1.1)$$

где T – постоянная величина, называемая периодом, n – любое целое число, положительное или отрицательное. [2]

В формуле (1.1) заложено основное свойство периодической функции: процесс периодически повторяется на всем протяжении времени от $-\infty$ до $+\infty$. Формула (1.1) выражает математическую модель, которая в реальном мире существовать не может.

Если принять во внимания ограничения: функция кусочно-непрерывна, ограничена и имеет на протяжении периода конечное число экстремальных значения (условия Дирихле), то такую периодическую функцию можно представить рядом по тригонометрическим функциям:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k). \quad (1.2)$$

где c_0 средняя амплитуда функции за период;

c_k амплитуда синусоидального колебания k ;

φ_k начальная фаза синусоидального колебания k ;

$k \frac{t}{T}$ частота синусоидального колебания k .

Таким образом, периодическая функция $f(t)$ представлена суммой слагаемых вида:

$$c_k \cos(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k).$$

Частоты колебаний $k \frac{t}{T}$ являются составляющими слагаемыми периодической функции $f(t)$, и образуют гармоническую последовательность. Таким образом, частоты всех составляющих кратны частоте $\frac{t}{T}$. Отдельные составляющие носят названия гармоник.

Формула (1.2) может быть разложена на тригонометрические составляющие и представлена форме:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T}), \quad (1.3)$$

где

$$a_k = c_k \cos \varphi_k, \quad b_k = c_k \sin \varphi_k,$$

так что

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{b_k}{a_k}.$$

Коэффициенты a_k и b_k определяются по формулам:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt, \quad (1.4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin 2\pi k \frac{t}{T} dt. \quad (1.5)$$

Величина c_0 вычисляется по формуле:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt. \quad (1.6)$$

Если взять конечное число значений гармоник N , и аппроксимировать функцию в тригонометрический полином то мы получим разложение функции в ряд Фурье:

$$f(t) \cong c_0 + \sum_{k=1}^N (a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T}). \quad (1.7)$$

Ряд Фурье возможно представить в комплексной форме:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j2\pi k \frac{t}{T}}, \quad (1.8)$$

где

$$2C_k = c_k e^{-j\varphi_k} = a_k - jb_k;$$

$$c_k = 2|C_k|; c_0 = C_0.$$

Величина $2C_k$ - это комплексная амплитуда; C_k находится по формуле:

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} dt. \quad (1.9)$$

Непериодическую функцию можно рассматривать как предельный случай периодической функции при неограниченно возрастающем периоде.

[2] Таким образом, разложение в ряд Фурье получают путем предельного перехода при $T \rightarrow \infty$ к формуле (1.8) с раскрытым значением C_k .

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j\omega t} d\omega \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\omega t} dt, \quad (1.10)$$

где ω - текущая частота, изменяющаяся непрерывно и $2\pi k \frac{t}{T} \rightarrow \omega$.

Представим формулу (1.10) в виде

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1.11)$$

где

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (1.12)$$

Выражения (1.11) и (1.12) являются основными формулами теории спектров. Данные выражения являются двумя преобразованиями Фурье, которые связывают между собой две функции: вещественную функцию времени $f(t)$ и комплексную функцию частоты $S(\omega)$. Так как функция $f(t)$ непериодическая, она при разложении является суммой бесконечно

большого числа бесконечно малых, колебаний бесконечно близких по частоте. Частотный интервал между колебаниями равен приращению текущей угловой частоты $d\omega$. При этом, комплексная амплитуда для каждого отдельного колебания равна:

$$dC = \frac{1}{\pi} S(\omega) d\omega. \quad (1.13)$$

Таким образом, интеграл Фурье определяет непериодическую функцию как сумма колебаний с непрерывной последовательностью частот, а ряд Фурье разлагает периодическую функцию суммой бесконечного числа синусоид, с дискретными значениями частот. Разложение непериодической функции содержит все частоты [14].

Ряд Фурье связывает периодическую функцию с периодическими гармониками её составляющими. Используя интеграл Фурье непериодическая функция представляется суммой периодических составляющих, таким образом сумма не обладает существенными свойствами своих слагаемых.

1.2 Структурные схемы анализаторов

1.2.1 Анализаторы спектра последовательного действия

Свицирующийся супергетеродинный анализатор спектра последовательного действия, имеющий традиционную архитектуру, несколько десятилетий назад позволил инженерам впервые провести измерения в частотной области. [6] Выполненные сначала полностью на аналоговых компонентах, эти анализаторы развивались в соответствии с требованиями приложений, в которых они применялись. В современных свицирующих анализаторах спектра используются цифровые компоненты, такие как АЦП, цифровые сигнальные процессоры и микропроцессоры. Однако принцип свицирования, по-прежнему используемый в этих анализаторах, наилучшим образом подходит для наблюдения только за

сигналами с предсказуемым поведением. Типовая структурная схема такого анализатора изображена на рисунке 1.1.

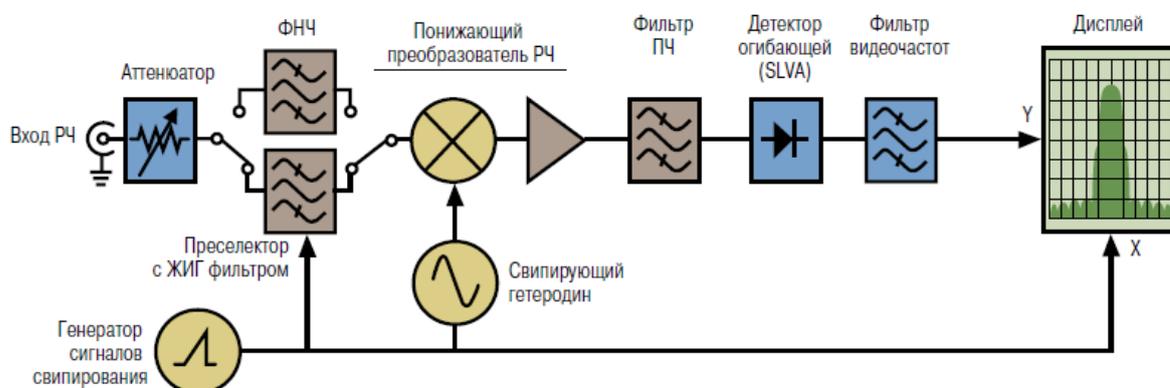


Рисунок 1.1 – Структурная схема супергетеродинного анализатора спектра

Модуляционную характеристику свирующего гетеродина обычно стремятся выполнить линейной для того, чтобы его частота колебаний изменялась под воздействием управляющего напряжения с генератора развертки линейно во времени. [9] Девиация частоты гетеродина Δf_z устанавливается с помощью регулировки полосы обзора такой, чтобы охватить весь спектр сигнала.

В этом случае по мере изменения частоты гетеродина составляющие спектра, как показано на рисунке 1.2, будут перемещаться относительно фиксированной частоты узкополосного фильтра, последовательно во времени попадая в полосу пропускания Δf_{nc} этого фильтра, значения которой устанавливаются регулировкой полосы пропускания. На вход детектора подаются сигналы с частотой заполнения, равной промежуточной частоте f_{nc} , и амплитудой, пропорциональной спектральной составляющей сигнала на частоте $f_{nc}(t_i) = f_z(t_i) + f_{nc}$. [9] После детектирования и усиления видеоимпульсы подаются на Y-пластины ЭЛТ. На X-пластины подаётся напряжение развёртки, которое является модулирующим напряжением при частотной модуляции гетеродина.

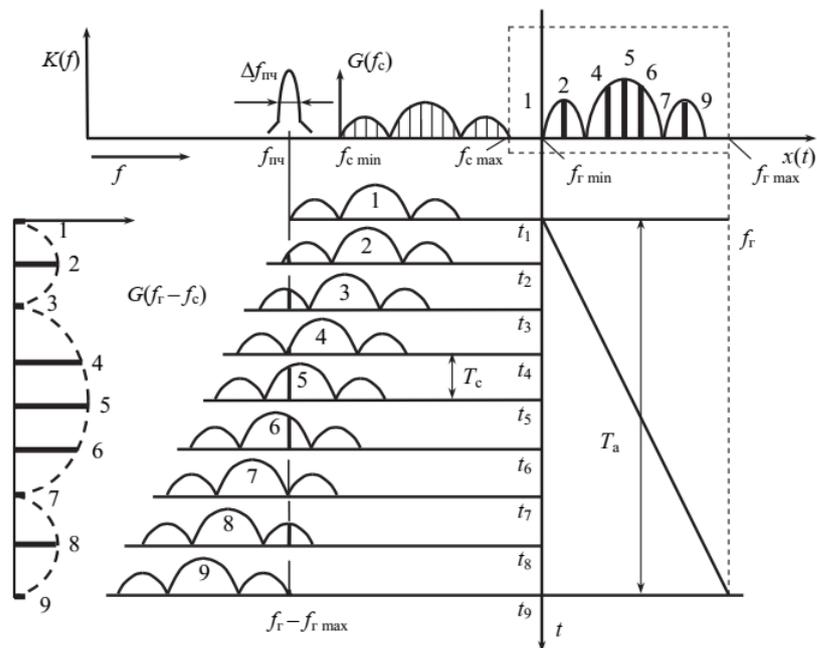


Рисунок 1.2 – Временные диаграммы работы анализатора спектра последовательного действия

На экране ЭЛТ составляющие спектра будут наблюдаться в виде вертикальных светящихся полос, имеющих конечную ширину, определяемую формой АЧХ узкополосного фильтра, и высоту, пропорциональную среднему значению спектральной плотности данного участка спектра сигнала.

Для наблюдения сигналов в широком диапазоне амплитуд последовательно с детектором с помощью переключателя ЛИН/ЛОГ включается логарифмический усилитель. В этом случае амплитуда спектральных составляющих на экране ЭЛТ отображается в логарифмическом масштабе.

В свипирующих анализаторах зависимость мощности от частоты определяется посредством преобразования исследуемого сигнала с понижением частоты и его свипирования в пределах полосы пропускания фильтра ПЧ, называемой полосой разрешения. [6] Детектор, включенный за фильтром ПЧ, вычисляет амплитуду на каждой частоте выбранной полосы обзора. Такое решение обеспечивает широкий динамический диапазон, но

обладает недостатком – в каждый момент времени амплитуда может быть вычислена только на одной частоте. Данный подход основан на допущении, что в течение полного свипирования измеряемый сигнал остается практически неизменным. Следовательно, достоверные измерения могут быть получены только для относительно стабильных входных сигналов. При резких изменениях сигнала возможен пропуск некоторых из этих изменений. Как показано на рисунке 1.3, анализатор спектра анализирует частотный сегмент F_a , в то время как кратковременное изменение в спектре происходит в сегменте F_b (изображение слева). Когда свипирование достигает сегмента F_b , данное событие прекращается, не будучи обнаруженным (изображение справа).

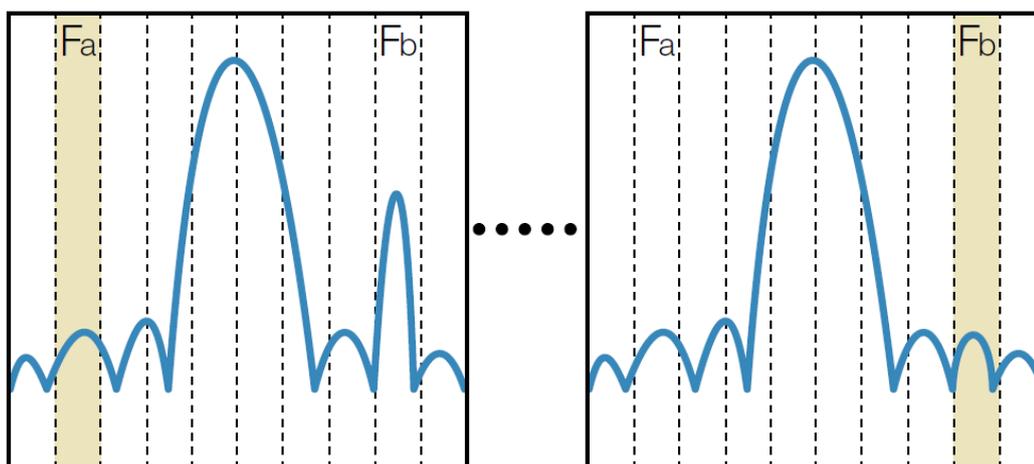


Рисунок 1.3 – Пропуск события при построении спектра

Анализаторы спектра последовательного действия не могут надежно регистрировать подобные явления, поэтому при их использовании для исследования РЧ сигналов большинства современных средств связи нельзя рассчитывать на высокую производительность. [13] Помимо пропуска кратковременных сигналов, имеется вероятность неправильного представления спектра импульсных сигналов, используемых в современных системах радиосвязи и РЛС. Свипирующие анализаторы позволяют получать спектр импульсного сигнала только при многократном свипировании. [4]

При этом особое внимание уделяется выбору скорости свипирования и полосы разрешения.

1.2.2 Анализаторы спектра параллельного действия

Анализаторы спектра параллельного действия применяют в основном для анализа спектров одиночных импульсных сигналов. При параллельном анализе спектра сигнала применяют n полосовых фильтров Φ , каждый из которых настроен на определённую частоту. Структурная схема приведена на рисунке 1.4 (а).

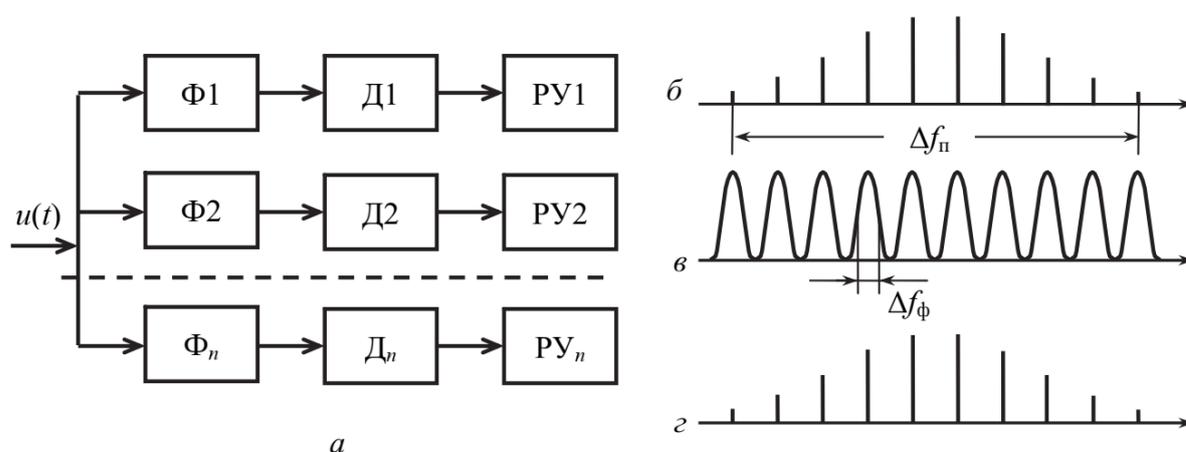


Рисунок 1.4 – Структурная схема анализатора спектра параллельного действия (а), спектры сигналов и АХЧ-фильтров (б–г)

Исследуемый сигнал $u(t)$, спектр которого расположен в полосе частот Δf_n , подается одновременно на все фильтры. Фильтры имеют идентичные АЧХ с одинаковыми полосами пропускания Δf_ϕ и настроены на определённые частоты (рисунок 1.4 (б)). Сигналы на выходе фильтров определяются составляющими спектра анализируемого процесса (рисунок 1.4 (г)). Далее спектральные составляющие, после детектирования в детекторах $Д$, поступают на регистрирующие устройства (РУ).

Полоса пропускания фильтра определяет статическую разрешающую способность анализатора (при условии время анализа $T_a \rightarrow \infty$, т. е. T_a – велико). Разрешающая способность анализатора – способность различать

составляющие спектра с близкими частотами. Чем уже полоса пропускания фильтра, тем выше разрешающая способность. [5] При широкой полосе пропускания несколько составляющих не будут разделяться. Если оценивать разрешающую способность полосой частот Δf_p , при которой возможно разделение ближайших составляющих, то при идеальной прямоугольной АЧХ фильтра можно полагать $\Delta f_p = \Delta f_\phi$. Для реальных фильтров $\Delta f_p = 2\Delta f_\phi$. Если время анализа T_a мало, то имеет место динамическая разрешающая способность.

Необходимое время анализа для правильного воспроизведения спектра можно приблизительно оценить следующим образом. Время анализа при параллельном исследовании может быть принято примерно равным τ_y – времени установления напряжения на выходе фильтра с прямоугольной частотной характеристикой и рабочей полосой Δf_ϕ (от уровня 0,1 до уровня 0,9 от установившегося значения). Из теории фильтров известно, что время установления $\tau_y = 0,86 / (\Delta f_\phi)$, следовательно, $T_a \approx \tau_y = 1 / (\Delta f_\phi)$. [18]

Скорость анализа резко снижается при сужении полосы пропускания фильтра. Достоинство анализаторов параллельного действия заключается в малом времени анализа.

Погрешность при параллельном анализе определяют следующие основные факторы: конечность времени установления колебаний на выходе фильтра и зависимость её от полосы пропускания, различие характеристик фильтров, настроенных на разные частоты.

1.2.3 Векторные анализаторы сигналов

При анализе сигналов с цифровой модуляцией для получения информации об амплитуде и фазе сигнала необходимы векторные измерения. Упрощенная структурная схема векторного анализатора сигналов приведена на рисунке 1.5.

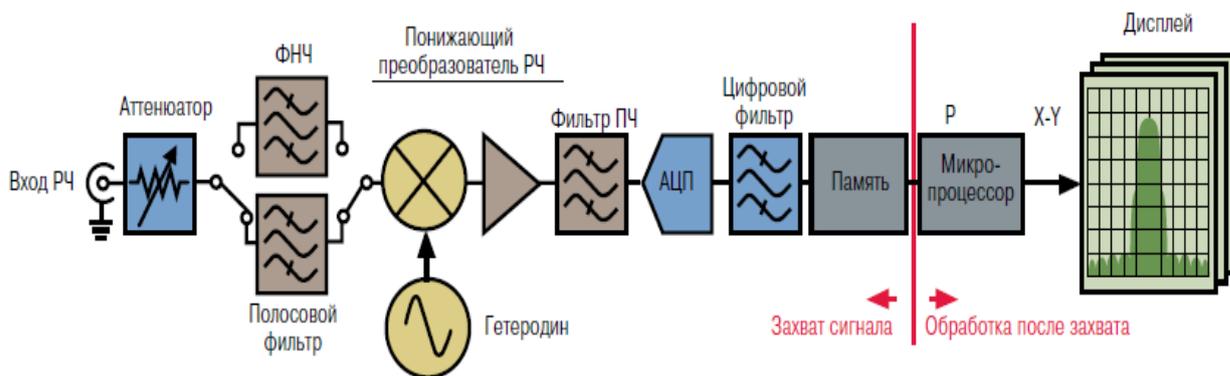


Рисунок 1.5 – Структурная схема векторного анализатора

Векторный анализатор преобразует входной РЧ сигнал в цифровую форму в пределах полосы пропускания прибора и записывает в память информацию об амплитуде и фазе преобразованного сигнала, которая используется цифровым сигнальным процессором для демодуляции, обработки и отображения результатов измерений АЦП, входящий в состав векторных анализаторов сигналов, оцифровывает широкополосный сигнал ПЧ, после чего преобразование с понижением частоты, фильтрация и детектирование выполняются цифровым способом. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) применяются для преобразования из временной области в частотную. Векторный анализатор измеряет параметры модуляции, например, девиацию частоты ЧМ сигнала, мощность в кодовой области, амплитуду вектора ошибки (EVM) и констелляционную диаграмму. Кроме того, с помощью векторного анализатора сигналов можно отображать мощность в канале, зависимость мощности от времени и спектрограммы.

Несмотря на возможность сохранения осциллограмм в памяти, векторный анализатор имеет ограниченные функции анализа кратковременных переходных процессов. В режиме автоматической развёртки, обычном для таких анализаторов, захваченные сигналы перед обработкой должны быть занесены в память. При последовательной

обработке пакетов данных прибор не реагирует на события, появляющиеся между моментами регистрации данных. Это затрудняет и даже делает невозможным обнаружение одиночных или редких событий. Для выделения этих событий в памяти можно использовать запуск по таким непериодическим событиям. Однако векторные анализаторы сигналов имеют ограниченные возможности запуска. Внешний запуск возможен только при наличии предварительной информации о рассматриваемом событии, получение которой практически нереально. При запуске по уровню ПЧ, выполняемом на основе измеренного изменения общей мощности сигнала ПЧ, слабые сигналы не могут быть выделены при наличии сильных сигналов, а также когда изменяется не амплитуда, а частота сигналов. Оба указанных случая характерны для современного динамического радиочастотного спектра.

1.2.4 Основные характеристики анализаторов

Диапазон частот характеризует граничные значения частотного интервала, в котором анализируются спектры сигналов. В случае анализа спектра радиоимпульсов эта характеристика даёт представление о диапазоне несущих частот сигналов, спектры которых могут быть исследованы прибором. При сопоставлении характеристик прибора и исследуемого радиоимпульса следует учитывать и ширину спектра, так как последняя иногда получается значительной. [3]

Рабочий диапазон частот определяется главным образом диапазоном перестройки частоты колебаний гетеродина (или средней частоты полосового фильтра). Практически область рабочих частот анализатора может быть расширена в результате использования гармоник гетеродина.

Разрешающая способность определяет минимальное расстояние по оси частот между двумя составляющими спектра, при котором могут быть

выделены отдельные линии и измерены их уровни. При анализе сплошных спектров от разрешающей способности зависит ширина «вырезаемого» участка спектра.

Строго говоря, полное разделение соседних составляющих недостижимо. Оно всегда в какой-то мере условно. Это видно на примере анализа спектра, состоящего из двух линий (рисунок 1.6). В резонаторе одновременно возбуждаются колебания двух частот и возникают биения с разностной частотой. Напряжение, фиксируемое индикатором, имеет вид двугорбой кривой.

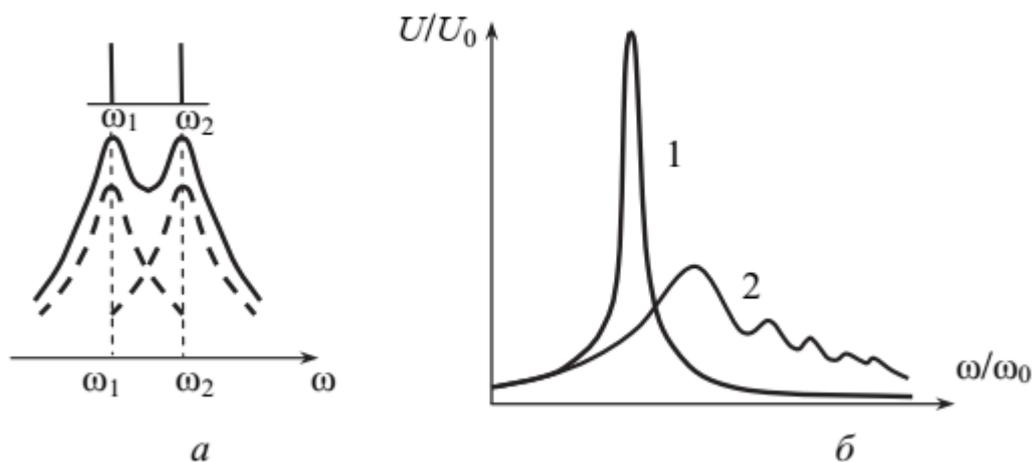


Рисунок 1.6 – Разрешающая способность

Разрешающую способность, являющуюся функцией лишь параметров полосового фильтра, называют статической. От неё отличают динамическую разрешающую способность, которая зависит не только от параметров избирательной системы, но и от времени. Динамическая разрешающая способность, являющаяся истинной разрешающей способностью анализатора, определяется динамической характеристикой (резонансной кривой) избирательной системы прибора.

Продолжительность анализа. При одновременном анализе его продолжительность определяется временем установления колебаний,

которое обратно пропорционально полосе пропускания Δf одиночного полосового фильтра. В случае последовательного анализа его продолжительность прямо пропорциональна ширине исследуемого спектра F и обратно пропорциональна квадрату полосы пропускания избирательной системы.

Таким образом, продолжительность последовательного анализа получается в $n = F / \Delta f$ раз большей, чем одновременного, и ее можно определить по формуле [5] :

$$t_{\text{посл}} = \frac{A}{\Delta f} \cdot \frac{F}{\Delta f} = A \frac{F}{\Delta f^2} \quad (1.14)$$

Скорость анализа. Во многих случаях исследования спектра требуется высокая скорость последовательного анализа. Однако при увеличении скорости изменения частоты разрешающая способность падает, так как становятся значительнее отличия динамической характеристики 2 (рисунок 1.6 (б)) анализатора от статической 1. Основные отличия заключаются в следующем:

- уменьшается коэффициент передачи и тем значительнее, чем быстрее изменяется частота;
- получается сдвиг максимума резонансной кривой как по частоте, так и по времени, увеличивающийся при возрастании скорости изменения частоты;
- происходит расширение резонансной кривой, вызванное тем, что при подходе к резонансу амплитуда нарастает плавно, а убывает с убыстряющимися с течением времени колебаниями; это обусловлено биениями между свободными колебаниями фильтра и возбуждающими его колебаниями;
- получается более тупая резонансная кривая, причем избирательность ухудшается при увеличении скорости изменения частоты.

Чувствительность. Анализаторы спектра являются приборами с высокой чувствительностью, так как часто применяются для исследования слабых сигналов. Чувствительность низкочастотных осциллографических анализаторов выражают в милливольтках. Чувствительность анализаторов СВЧ характеризуют такими же величинами, как чувствительность приемников СВЧ. В паспорте обычно указывают чувствительность по отношению к монохроматическим сигналам. При исследовании спектров импульсных сигналов чувствительность значительно меньше и зависит от длительности импульса.

1.3 Обзор существующих программно-технических средств

В лабораторных работах отделения ОАР используется анализатор спектра в составе осциллографа АКТАКОМ АСК-2041. А так же виртуальный прибор анализатор спектра NI ELVIS Dynamic Signal Analyzer (DSA) в среде LabView. Приборы имеют свои недостатки, о которые будут описаны ниже. Для сравнения технических характеристик и функциональных возможностей будет рассмотрен анализатор спектра Tektronix RSA603A.

1.3.1 Осциллограф АКТАКОМ АСК-2041

Осциллограф цифровой АКТАКОМ АСК-2041 предназначен для исследования формы электрических сигналов путем визуального наблюдения на жидкокристаллическом индикаторе и измерения их амплитудных и временных характеристик.



Рисунок 1.7 – Внешний вид осциллографа АКТАКОМ АСК-2041

Принцип действия осциллографов основан на аналого-цифровом преобразовании входного сигнала с задаваемой частотой выборки, регистрации цифровых данных в запоминающем устройстве для последующей цифровой обработки и отображения на жидкокристаллическом матричном цветном или монохромном дисплее. [7]

Программное обеспечение осциллографа управляет режимами работы, обработки цифровых данных, их отображения на дисплее, передачи на USB-накопитель. ПО обеспечивает выполнение следующих функций обработки цифровых данных:

- автоматических измерений (до 24 параметров);
- курсорных измерений;
- математической обработки, включая функцию быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Основные технические характеристики осциллографа АКТАКОМ АСК-2041 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики АСК-2041

Характеристика	Значение
Параметры каналов вертикального отклонения	
Пределы допускаемой относительной погрешности коэффициента отклонения, %:	
- с пробником X1 (1:1);	± 4
- с пробником X10 (1:10)	± 5
Диапазон установки коэффициента отклонения каждого из каналов	от 2 мВ/дел до 5 В/дел
Полоса пропускания (-3 дБ), МГц	0-40
Число разрядов АЦП	8

Продолжение таблицы 1 – Технические характеристики АСК-2041

Параметры канала горизонтального отклонения	
Пределы допускаемой относительной погрешности коэффициента развертки, %	$\pm 0,5$
Максимальная частота дискретизации, МГц:	200 реальная, 20000 эквивалентная

Наличие функции БПФ, фактически позволяет проводить анализ спектра с помощью осциллографа. БПФ может при меняться, если необходимо измерить коэффициент гармоник или произвести анализ колебаний, измерить шумовые характеристики источников питания и т.п. Цифровой осциллографы предлагает 5 окон для БПФ.

Окно БПФ определяет область данных (точки выборок осциллографа), по которым оно осуществляется. Теория БПФ исходит из предположения о периодическом сигнале и для идеального преобразования не обходимо выделить точно один или несколько периодов сигнала, что для реального сигнала сделать точно никогда не удастся. Это приводит к разрывности исходной функции и к искажению (расширению) расчетного частотного спектра.

Оконная функция БПФ используется для подавления краевых эффектов разрывности реальных функций путем введения весовых коэффициентов для выборки данных в окне, обеспечивающих снижение амплитуд краевых точек (старта и стопа) и, в результате, улучшение результатов. [8] Однако надо понимать, что этими действиями вносятся искажения в исследуемый сигнал.

1.3.2 Анализатора спектра DSA

Виртуальный прибор DSA является частью ПО платформы NI ELVIS. Физически платформа состоит из рабочей станции и DAQ-устройства, выполняющего функцию ввода – вывода. Рабочая станция обеспечивает подключение исследуемых объектов и определяет функциональность лабораторной установки.

Программная часть состоит из ПО низкого уровня, маршрутизирующего сигналы в настольной рабочей станции и между приборами. А так же пакета виртуальных приборов, предназначенных для измерения, генерации и анализа полученных сигналов. [27]

Прибор DSA использует аналоговый вход модуля ввода-вывода NI ELVIS. Он относится к цифровым анализаторам параллельного типа в виде БПФ-анализатора, который вычисляет спектр с помощью алгоритмов быстрого преобразования Фурье.

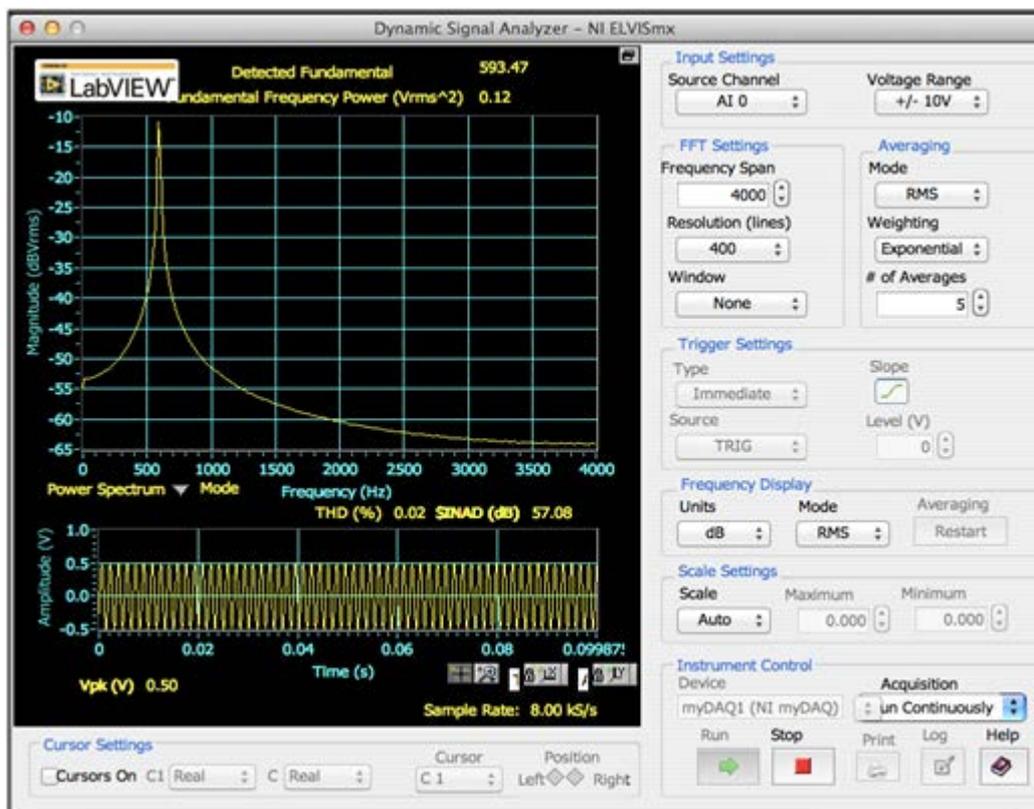


Рисунок 1.8 – Панель виртуального прибора DSA

При выборе верхней границы частотного диапазона, прибор автоматически выставляет частоту квантования входного сигнала. Эта особенность исключает возможность одновременного использования анализатора спектра и других приборов, использующих аналоговый ввод сигналов, например, осциллографа, то есть исключается возможность одновременного наблюдения формы и спектра сигналов.

Шаг квантования по частоте алгоритма БПФ обратно пропорционален длительности сигнала. [10] Для анализа в DSA задается верхняя граница частотного диапазона и количество точек в спектрограмме, таким образом, шаг квантования определяется расстоянием между двумя точками в спектрограмме. Определение времени анализа осуществляется автоматически.

Алгоритм БПФ разбивает весь диапазон частотного анализа на равные отрезки, таким образом, разрешающая способность прибора не зависит от частоты анализа и определяется шагом квантования по частоте и не может быть увеличена по причине отсутствия возможности задания конкретного диапазона частот для анализа.

Для БПФ необходимо использовать только сигналы определённой длины, конкретно – длина сигнала в выборках должна быть степенью двойки. Таким образом, БПФ корректно работает с массивом из 1024 (или 512, или 2048) точек сигнала, но не с массивом из 1000 (или 500 или 2000) точек. В результате, обычный калибровочный сигнал частотой 1 КГц, снятый на частоте дискретизации 10 МГц, невозможно подвергнуть БПФ на его длине периода, который в этих условиях будет составлять 1000 точек, придётся либо использовать для анализа область чуть больше – 1.024 периода сигнала (и тем самым гарантированно исказить спектр сигнала, ведь преобразование Фурье должно проводиться ровно на участке периода сигнала либо кратном ему), либо предварительно провести передискретизацию тысячеточечного

сигнала на виртуальную частоту дискретизации 10,24 МГц, и, возможно, исказить в результате применяемой интерполяции форму сигнала, что в итоге также приведёт к искажениям спектра. [12]

Недостатки существующих в лаборатории средств напрямую связаны с тем, что основаны на алгоритме БПФ, с особенностями описанными выше. Кроме того, в функционале DSA отсутствуют необходимые инструменты:

- отсутствует выбор шкалы отображения (линейной / логарифмической);
- недоступность выбора времени анализа сигнала;
- невозможность задания конкретного диапазона частот анализа;
- необходимость глубокого понимания вычисления БПФ, для задания начальных условий, напрямую влияющих на корректность построения спектра.

2 Виртуальный прибор «Анализатор спектра»

2.1 Техническое задание

Разработка виртуального прибора (ВП) «Анализатор спектра» в системе LabView.

Назначение разрабатываемого прибора – применение в лабораторных работах при обучении студентов НИ ТПУ.

Требуемый функционал прибора:

- считывание входного сигнала через DAQ-устройство М серии NI 6251;
- выбор частоты получения выборки сигнала;
- построение спектра сигнала, с возможностью ручной установки задания времени анализа, разрешения, диапазона анализа частот;
- отображение спектра в логарифмическом и линейном масштабах;
- расчет амплитуд и частот гармоник;
- расчет коэффициента гармоник;
- возможность сохранения оцифрованного массива спектра сигнала.

Требуемые технические характеристики:

- диапазон частот входного сигнала от 1 до $5 \cdot 10^3$ Гц;
- максимальная амплитуда входного сигнала 5 В.

2.2 NI USB 6251

DAQ – устройство М серии NI USB 6251 предназначено для осуществления функционала модуля ввода вывода для среды разработки LabVIEW. Устройство обладает следующими техническими характеристиками:

- 16 каналов аналогового входа;

- 2 канала аналогового выхода;
- 24 канала дискретного ввода / вывода;
- разрядность АЦП: 16 бит;
- максимальная частота выборок входного сигнала 1,25 MS/s;
- максимальная частота выборок выходного сигнала 2,86 MS/s;
- два 32-битных счетчика/таймера.

Устройство предназначено для экономичной и надежной реализации функционала сбора данных для обширного спектра областей применения, от простой автоматизации лабораторных исследований и до сложных научно-исследовательских работ, а также испытаний на производстве. Внешний вид устройства приведен на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Внешний вид NI USB 6251

NI USB 6251 выполняет цифроаналоговые и аналогово цифровые преобразования для генерации и считывания сигналов, а также воспринимает и формирует дискретные сигналы цифрового ввода / вывода. [17]

Устройство управляется по средствам набора драйверов NI-DAQ, представляющего собой обширную подбору функций и виртуальных приборов, по средствам которых осуществляется настройка и программирование всех свойств и возможностей.

Основной задачей нашего ВП является анализ периодических и не периодических сигналов, поступающих на аналоговый ввод устройства. Качество анализа напрямую зависит от того, насколько точно сигнал был передан в среду LabVIEW. Поэтому остановимся подробнее на техническом устройстве системы аналогового ввода и возможности её использования.

Схема устройства канала аналогового ввода приведена на рисунке 2.2.

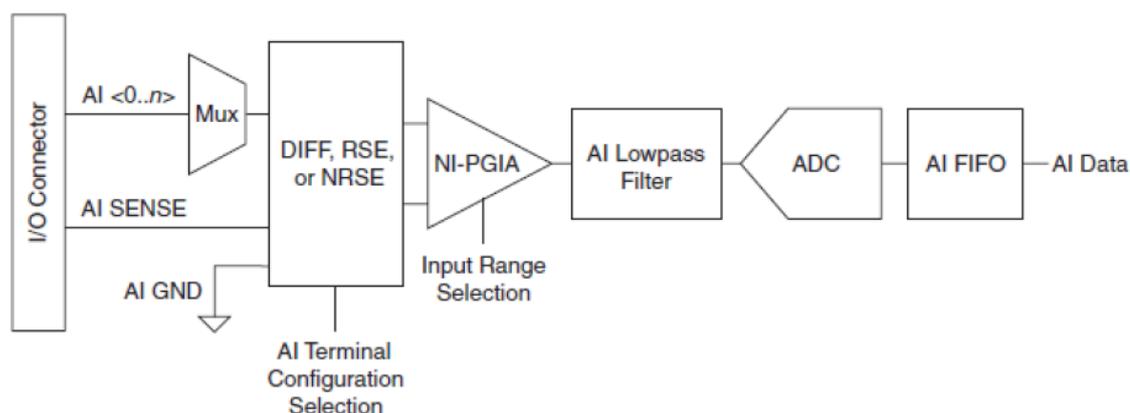


Рисунок 2.2 – Подсистема аналогового ввода

Как видно из схемы основными элементами считывания аналогового сигнала состоит из следующих принципиальных узлов:

- I/O Connector - разъем ввода-вывода (физическое подключение);
- Mux - мультиплексор, поочередно подающий сигналы с каждого канала аналогового ввода, ;
- DIFF, RSE or NRSE - система конфигурации подключения канала;
- NI-PGIA - инструментальный измерительный усилитель с программируемым коэффициентом усиления – минимизирует времена установления для всех диапазонов входного сигнала;
- AI Lowpass Filter - низкочастотный фильтр, при влечении отсекает частоты выше заранее сконфигурированной;
- ADC - АЦП преобразует сигнал в цифровую форму;

- AI FIFO - буфер аналогового ввода типа «очередь». NI USB 6251 может выполнять как многократные так и одиночные аналого-цифровые преобразования с заданием бесконечного или конечного количества отсчетов. Во избежание потерь данных FIFO-буфер большого объема хранит данные в процессе измерений аналогового входного сигнала. Так же реализован функционал многократных аналого-цифровых преобразований с режимом прямого доступа к памяти (ПДП), по средствам программируемого ввода-вывода или прерываний.

Диапазон амплитудных значений аналогового ввода является рядом входных напряжений, преобразованных в цифровую форму с заданным допуском. На разрешающую способность канала аналогового ввода, которая представляет собой напряжение, соответствующее одному кванту АЦП, напрямую влияет заданный диапазон входного измерения. В нашем случае 16-разрядный АЦП преобразует аналоговые входные сигналы в одну из $65536 = 2^{16}$ кодовых комбинаций, таким образом в одно из 65536 возможных чисел, равномерно распределенный по диапазону. [20] Следовательно, для диапазона входного сигнала от -5 В до 5 В каждому кванту 16-разрядного АЦП соответствует напряжение 160 мкВ.

Широкие возможности управления позволяют проводить измерения аналоговых величин как с аппаратной синхронизацией, так и с программной. При программной синхронизации сбора данных частотой дискретизации управляет ПО. Для того, чтобы инициировать очередное аналого-цифровое преобразование, ПО посылает устройству сбора данных специальную команду. В NI-DAQmx режим программной синхронизации сбора данных называют синхронизацией по требованию (on-demand). Этот режим называют также непосредственным или статическим режимом и обычно используется для получения одного отсчета данных. При аппаратной синхронизации сбора данных – частотой дискретизации управляет аппаратно-формируемый цифровой сигнал AI Sample Clock, который может

либо генерироваться самим устройством сбора данных, либо подаваться на него с внешнего генератора.

Аппаратная синхронизация по сравнению с программной имеет следующие преимущества:

- возможно задание значительно меньшего интервала дискретизации;
- интервал времени между отсчетами является детерминированным;
- возможно использование аппаратного запуска.

2.3 Реализация ВП

2.3.1 Основной алгоритм расчета спектра сигнала

Для получения конкурентных преимуществ по сравнению с используемыми программно-техническими средствами было решено отказаться от типового построения спектра на основе алгоритмов БПФ.

Формулу (1.12) для процесса ограниченного во временных рамках можно представить в виде: [21]

$$S(f) = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} U(t) \cdot e^{-i2\pi f t} dt. \quad (2.1)$$

где t_1, t_2 – границы интервала времени сигнала, для которого определяется спектр;

$U(t)$ – мгновенное значение сигнала в момент времени t ;

f – текущая частота, для которой рассчитывается спектр.

Однако работая при считывании сигнала, мы получаем набор дискретизированных по уровню и времени значений, получаемых после АЦП. Для приближенной реализации интегрирования в дискретной форме имеется ряд алгоритмов, таких как метод прямоугольников и метод трапеций. Поскольку количество отсчетов в общем случае использования приборов достаточно велико, для численного расчета, исходя из оптимизации

ресурсов, будем использовать метод прямоугольников. В таком случае интеграл будет представлен следующей суммой:

$$S(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \cdot e^{-j2\pi f_i dt} dt, \quad (2.2)$$

где $dt = \frac{1}{f_k}$ – шаг квантования сигнала по времени;

f_k – частота квантования сигнала;

N – количество выборок во входном буфере сигнала.

В расчете данной формы частота квантования задается начальными условиями, и ограничена максимальной частотой получения выборок с NI USB 6521. Количество выборок во входном буфере сигнала прямо пропорционально времени анализа и частоте квантования и обратно пропорциональна шагу квантования по времени. Таким образом, количество отсчетов буфере вычисляется как:

$$N = \frac{t_2 - t_1}{dt} \quad (2.3)$$

Для расчета спектрограммы по формуле (2.2) необходимо на каждой итерации сбора данных для бесконечно малых отрезков частоты необходимо полностью вычислять интеграл Фурье. В реальных задачах необходимо анализировать спектр в заранее известном диапазоне частот. Кроме того этот диапазон возможно разбить отрезки с требуемой дискретностью значений. Для этого необходимо создать массив для сохранения данных спектрограммы длиной, равной числу интервалов в анализируемой полосе частот. Зная такие параметры расчета как верхняя и нижняя частоты диапазона, длина массива для сохранения спектрограммы, шаг квантования по времени, число итераций мгновенных значений сигнала (длина входного буфера), а также зная мгновенное значение оцифрованного сигнала, возможно рассчитать спектр без использования входного буфера для сохранения данных сигнала, проводя анализ в реальном времени.

Полную сумму возможно получить рекурсивно путем суммирования результатов расчета в текущий момент времени с предыдущим результатом расчета:

$$(S_i) = S \cdot \frac{N - 1}{N} + S_i \cdot \frac{1}{N} \quad (2.4)$$

Алгоритм расчета спектрограммы по вышеописанному методу приведен в приложении Б.

2.3.2 Реализация алгоритма в среде LabVIEW

В программной части основное считывание сигнала осуществляется по средствам обращения к функционалу пакета драйверов NI-DAQmx. Блок-диаграмма основного алгоритма прибора отображена на рисунке 2.3.

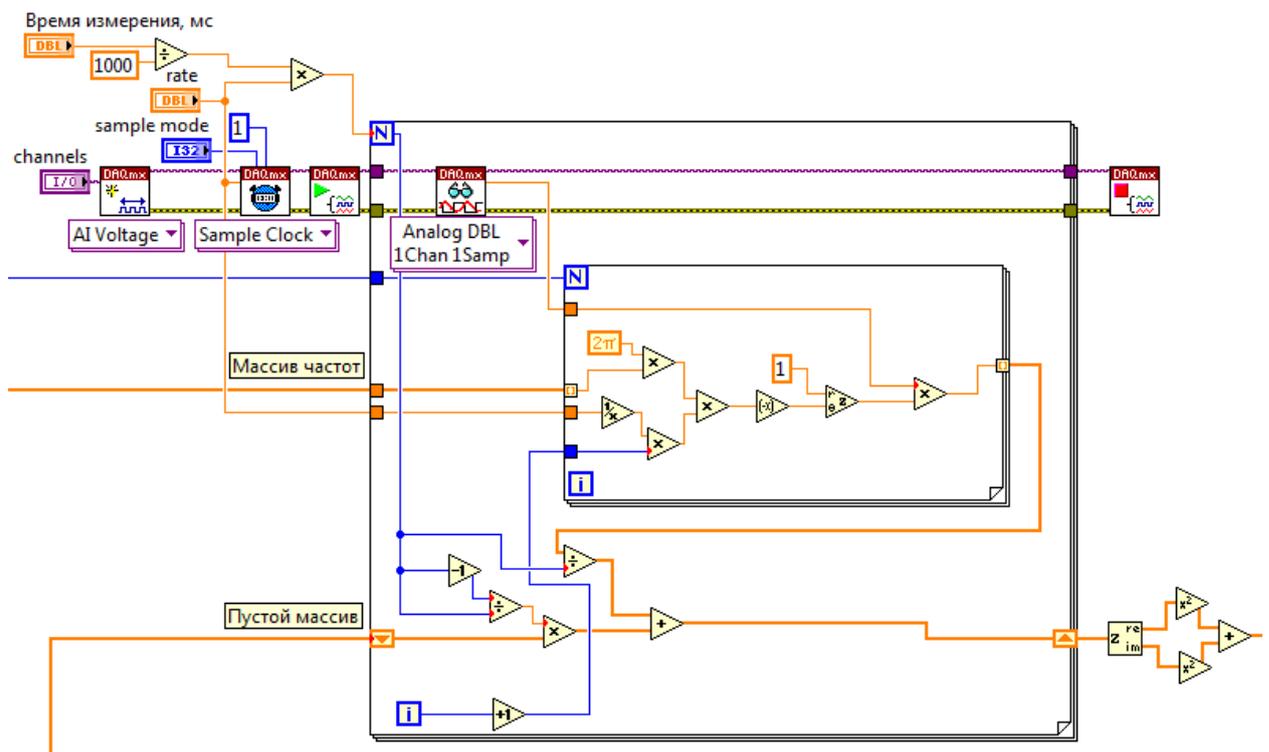


Рисунок 2.3 – Расчет спектра сигнала

Для получения сигнала первоначально блок DAQmx Create Virtual Channel создает виртуальный канал для измерения напряжения, ассоциируя его с физическим каналом NI USB 6251. Далее через блок DAQmx Timing

устанавливается количество отсчетов считывания. Тип тактирования задается выбором вариантов. Дополнительные параметры тактирования настраиваются в свойствах этого виртуального прибора (ВП) и дополнительных опциях. Значения констант Samples per Channel и Rate определяют, сколько будет братья отсчетов для канала и с какой частотой дискретизации. В нашем случае настройки блоков создания задачи по считыванию позволяют нам получать по 1 значению в каждый момент времени с заданной частотой Rate. Частота ограничена физическими возможностями устройства, а так же при ее выборе необходимо понимать, что более высокое значение увеличит вычислительные нагрузки, но значение не может быть ниже удвоенного значения частоты снимаемого сигнала, для того что бы соответствовать теореме Котельникова. На практике это значение лучше задавать в три – четыре раза больше частоты исследуемого сигнала, для получения релевантных результатов. После создание начальных условий и конфигурировании системы аналогового ввода блок VI DAQmx Read снимает квант состояния сигнала, который обрабатывается циклом расчета спектральных составляющих. Расчет происходит для каждой частоты из интересующего диапазона с заданным разрешением анализа. Результаты добавляются в общую сумму спектрограммы в комплексной форме. Действительные значение спектра рассчитываются по завершении заданного времени анализа.

Частотный массив, для оси X при временном отображении сигнала, формируется отсчетом итераций цикла, с поправкой на ранее заданную частоту считывания сигнала.

2.4 Функционал ВП «Анализатор спектра»

Основное окно виртуального прибора «Анализатор спектра» приведено на рисунке 2.4.

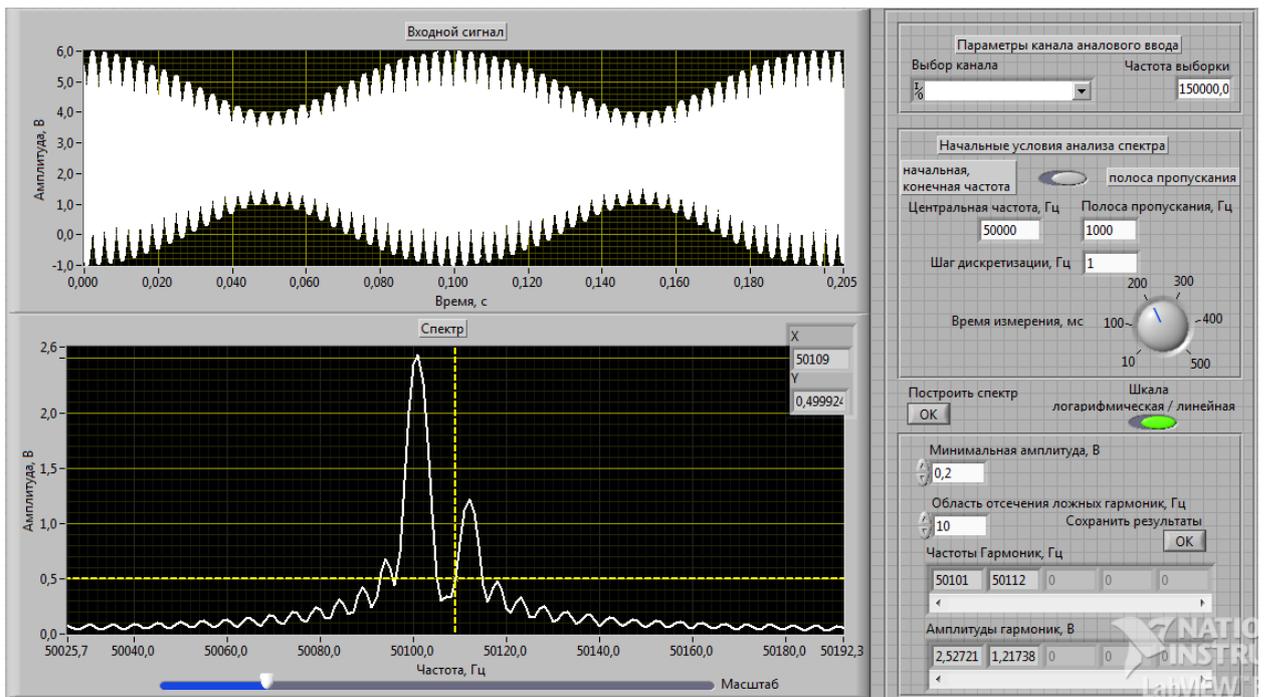


Рисунок 2.4 –Окно виртуального прибора «Анализатор спектра»

Как видно, в процессе анализа сигнал отображается во временной и частотной составляющих. Построение спектра осуществляется после задания начальных настроек, таких как канал измерения, частота выборки, частотный диапазон анализа и разрешающая способность. После подачи на аналоговый канал сигнала из задания первоначальных настроек необходимо нажать кнопку «Построить спектр» для получения спектрограммы.

При построенной спектрограмме реализован функционал анализа:

- перемещение курсора с привязкой к графику и отображением координат;
- масштабирование оси частот относительно положения курсора;
- вывод численных значений частот и амплитуд гармоник, с ограничением точности по частоте отсека ложных гармоник и минимальной амплитудой;
- сохранение массива гармоник в файл на персональном компьютере;
- расчет коэффициентов нелинейности сигнала.

Так же реализован выбор отображения спектра в логарифмическом или линейном масштабах. Логарифмический масштаб рассчитывается по формуле:

$$A = 20 \log_{10} \frac{S_i}{S_{min}} \quad (2.5)$$

где A – расчетное значение усиления в дБ;
 S_i – амплитуда i -ой частотной составляющей;
 S_{min} – минимальное значение амплитуды спектрограммы.

Рассмотрим подробнее реализацию функционала виртуального прибора.

2.4.1 Задача диапазона частот

Одним из основных параметров анализа является задание диапазона анализируемых частот и шага дискретизации данного диапазона. В виртуальном анализаторе спектра реализовано два варианта задачи данных начальных условий:

- центральная частота и полоса пропускания;
- минимальная и максимальная частота.

Для того, чтобы не загромождать основную блок диаграмму анализатора спектра данный функционал вынесен в подключаемый прибор «Range to array». Блок диаграмма представлена на рисунке 2.5.

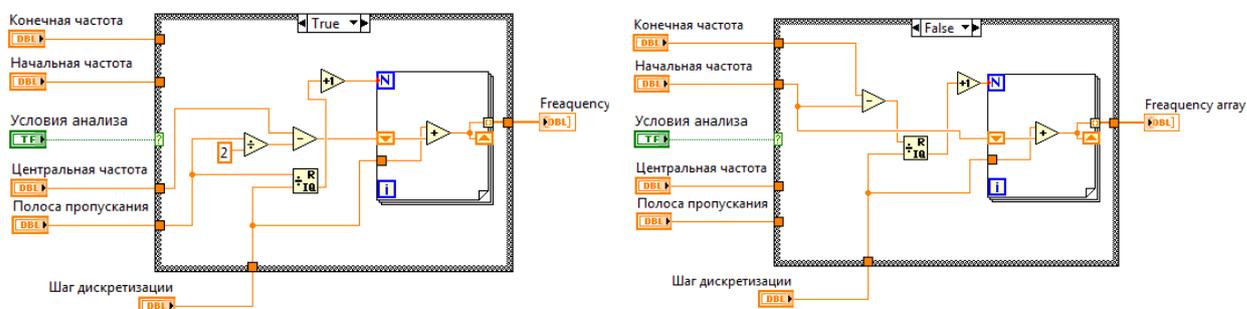


Рисунок 2.5 – Блок – схема виртуального под-прибора «Range to array»

При изменении способа задачи сигнала поля ввода, не задействованные в текущем способе, автоматически скрываются для повышения удобства использования ВП.

2.4.2 Расчет гармоник

Классически, анализ полученного спектра сигнала производился визуально, используя размерную сетку и масштаб текущих значений на вертикальной и горизонтальной осях экрана анализатора. Для имитации функционала реализована возможность считывания координат курсора, а также изменения масштаба по оси частот, для возможности увидеть разделение полученных близких пиков сигналов на широкой полосе частот. Также реализована возможность переключения масштаба шкалы амплитуд на логарифмический, для возможности анализа сигнала с гармониками, амплитуда которых различаются в несколько раз.

Кроме этого разработан виртуальный под-прибор «Harmonic research» осуществляющий анализ рассчитанного массива значений спектра, и поиск гармонических составляющих сигнала, с ограничением по минимальной амплитуде или усилением и расстоянию по частоте между гармониками, для того что бы исключить включение в результат шумовых составляющих. Блок схема виртуального под-прибора «Harmonic research» приведена на рисунке 2.6.

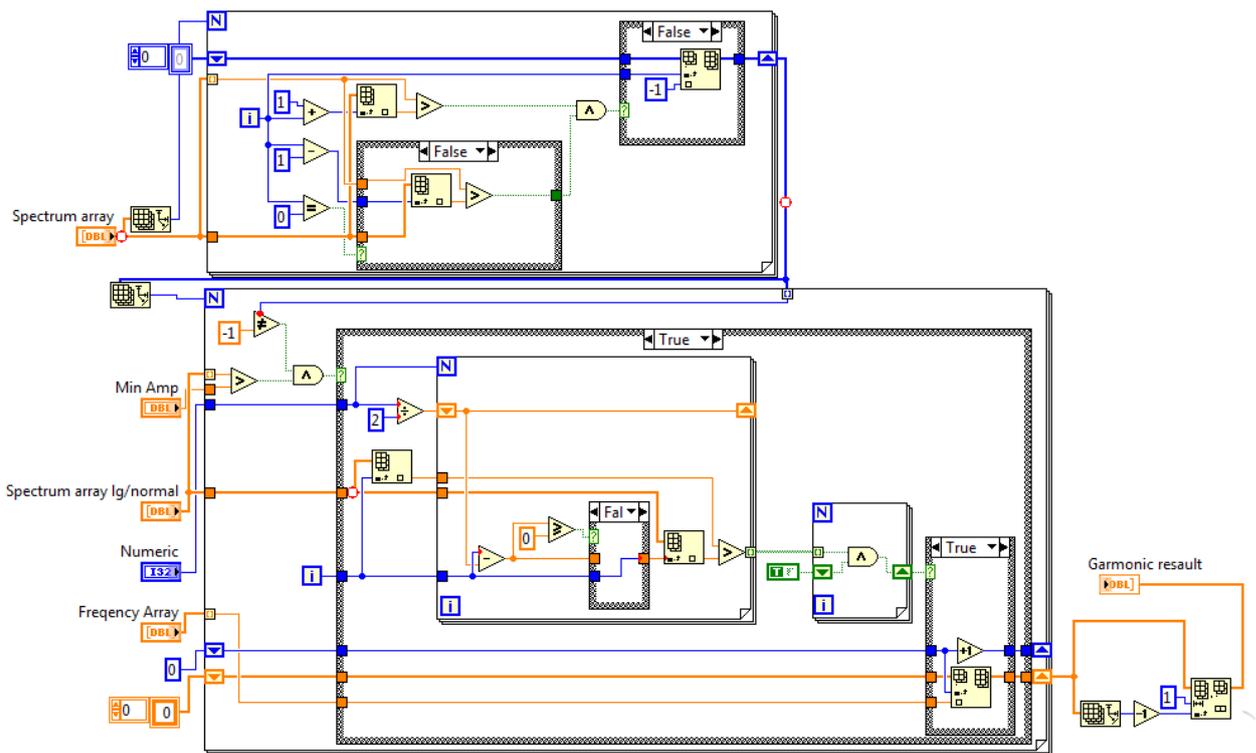


Рисунок 2.6 – Блок – схема виртуального под-прибора «Harmonic research»

Алгоритм блока поиска гармоник с допустимой погрешностью заключается в поэтапном разбиении диапазона на равные под-массивы. В последующем поиск локальных максимумов в каждом под-массиве, удовлетворяющих условию, что они больше заданной амплитуды. После этого вокруг найденных локальных максимумов формируются под-массивы второго этапа, длиной частному допустимой погрешности и заданным разрешением анализа. Если локальные максимумы являются максимумами в созданных под-массивах второго этапа, то они принимаются найденными гармониками. Их значение и индекс в первоначальном массиве спектрограммы записывается. Индекс сопоставляется с значением частоты гармоники и полученная информация выводится на экран. Блок-схема алгоритма приведена в приложении В.

Полученные значения можно сохранить в виде двумерного массива, нажатием на кнопку «Сохранить результаты». Сохранение реализовано стандартным функционалом LabVIEW.

2.4.3 Расчет коэффициентов гармоник

Важными параметрами низкочастотных (килогерцовой области) радиотехнических сигналов являются коэффициент нелинейных искажений гармоник КГИ (в зарубежной литературе используется термин total harmonic distortions THDf) и коэффициент гармонических искажений (КГИ или THDr). КГИ это величина, выражающая степень нелинейных искажений сигнала, равна отношению среднеквадратичного значения всех высших гармоник сигнала к напряжению первой гармоники, рассчитывается по формуле:

$$\text{КГИ} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

где U_i - амплитуда напряжения i -ой гармоники сигнала.

КНИ - величина для количественной оценки нелинейных искажений, равная отношению среднеквадратичного значения всех высших гармоник сигнала, к среднеквадратичному значению спектральных компонентов всего сигнала кроме постоянной составляющей:

$$\text{КНИ} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}} \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

Для оценки данных параметров сигнала разработан виртуальный под-прибор «ТНД», анализирующий спектрограмму и осуществляющий вычисления. Блок-схема виртуального под-прибора приведена на рисунке 2.7.

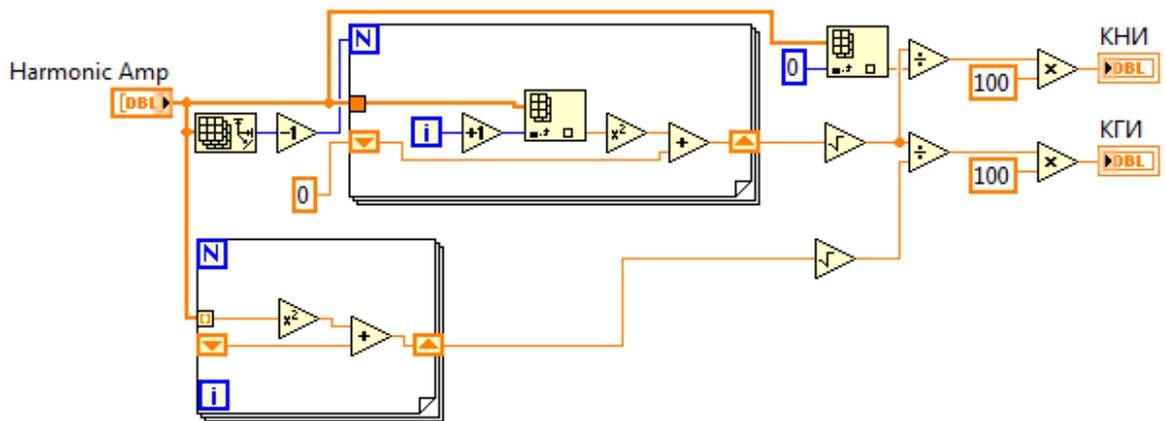


Рисунок 2.7 – Блок-схема виртуального под-прибора «ТНД»

Входными данными для расчета являются уже полученные ранее массивы амплитуд и частот гармоник.

Основное окно блок-схемы виртуального прибора «Анализатор спектра» приведено в приложении Г.

3 Экспериментальная часть

Для выявления функциональных возможностей разработанного ВП была проведена серия экспериментов. Было проведено опробование работоспособности разработанного ВП в условиях лаборатории путем сравнения с физическим анализатором спектра. Также проведен численный эксперимент по тестированию возможностей разработанного ВП «Анализатор спектра». Проанализирована корректность построения спектральных составляющих тестовых сигналов с известным спектром.

3.1 Опробование

Тестовое опробование было проведено в условиях лаборатории. Для этого было использовано следующее оборудование:

- ПК с установленным программным пакетом LabVIEW с набором драйверов DAQmx;
- DAQ устройство М серии NI USB 6251;
- генератор сигнала АКТАКОМ AWG-4105 (2 экземпляра);
- осциллограф цифровой АКТАКОМ АСК-2041.

Генератор использовался для задачи периодических сигналов стандартных форм. Цифровой осциллограф АСК-2041 с возможностью БПФ использовался как образцовое СИ при анализе спектра.

Внешний вид экспериментальной установки приведен на рисунке 3.1.

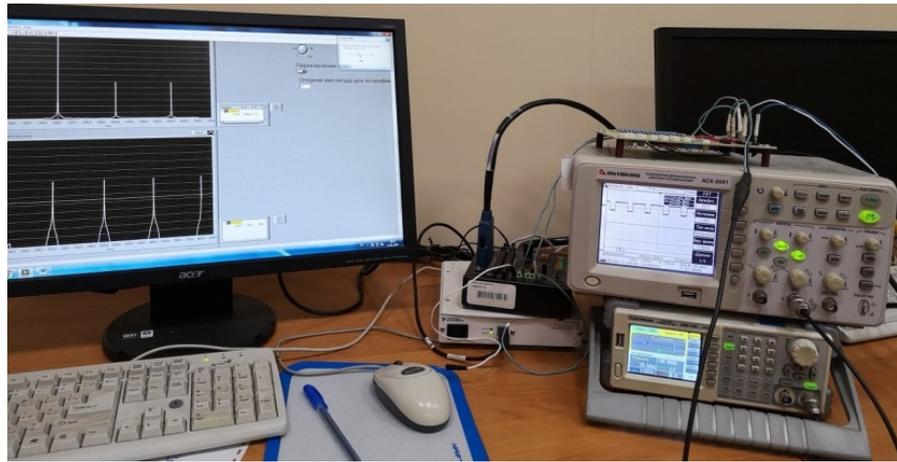


Рисунок 3.1 – Экспериментальная установка

Выход генератора был параллельно подключен к входу осциллографа АСК-2041 и аналоговому входу устройства NI USB 6251. При генерации использовались сигналы различных форм: синусоида, меандр, пилообразный, треугольный. Производилось сравнение полученных спектрограмм на осциллографе, использующим алгоритмы БПФ, и в ВП «Анализатор спектра», основанный на интеграле Фурье. По результатам опробования были получены результаты работоспособности разработанного ВП «Анализатор спектра».

Так же в ходе опробования был проведен анализ расчета коэффициентов искажения. Для этого на вход были поданы сигналы меандр и пилообразный. КГИ (КНИ) для идеальных сигналов известен и равен для меандра 48% (43%), для пилообразного 80% (63%).

Анализ проводился для сигналов частотой 500 Гц, в диапазоне частот от 0 до 15000 Гц с шагом дискретизации 1 Гц. Построенная спектрограмма пилообразного сигнала в логарифмическом масштабе приведена на рисунке 3.2.

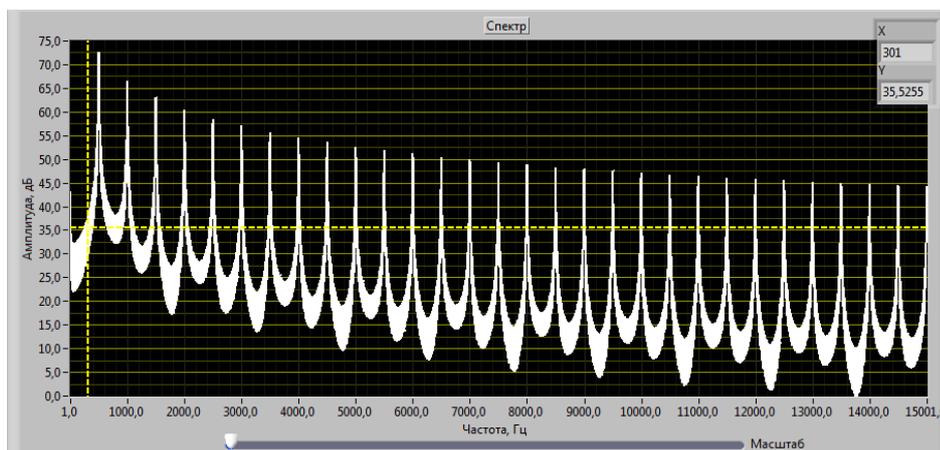
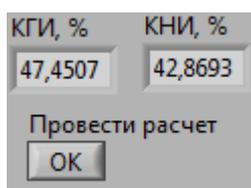
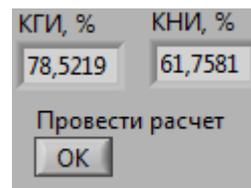


Рисунок 3.2 – Спектрограмма пилообразного сигнала

Расчет коэффициентов виртуальным прибором производился после задания параметров по поиску гармонических составляющих. Результаты приведены на рисунке 3.3.



а) Меандр



б) Пилообразный

Рисунок 3.3 – Рассчитанные ВП коэффициенты искажений

Как видно результаты близки к идеальным значениям. Различия объясняется тем, что при получении расчётного значения сигнал анализируется на бесконечном диапазоне частот, при реальном анализе диапазон частот ограничен, и в расчет попадают только гармоники в него входящие.

3.2 Определение технических характеристик

Численный эксперимент осуществлялся вне условий лаборатории. Для этого в виртуальный прибор был добавлен виртуальный под-прибор «Generate.vi» генератор тестового сигнала со следующим функционалом:

- формирование выборки соответствующей сигналу различных форм, с возможностью задачи частоты, амплитуды и частоты дискретизации, смещение относительно нуля;
- подключение подмешивание второго сигнала с различными от первого параметрами (форма, частота, амплитуда);
- подключение подмешивания «белого шума» в сгенерированную выборку.

Блок-схема под-прибора приведена на рисунке 3.4.

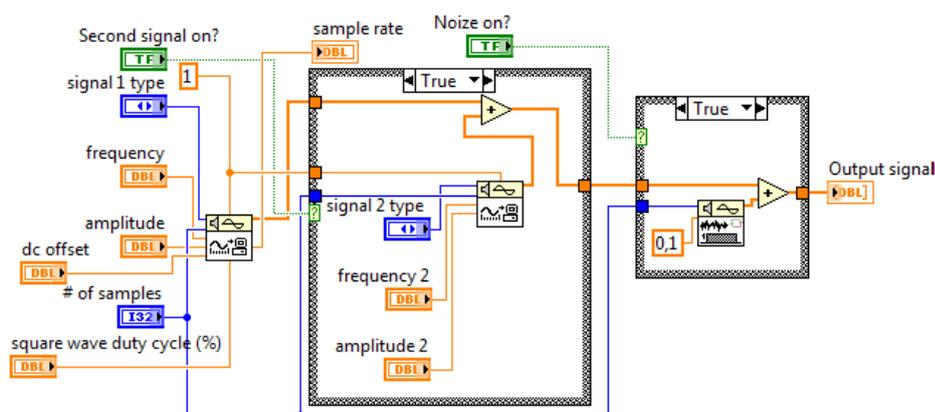


Рисунок 3.4 – Блок-схема ВП «Generate.vi»

Цель эксперимента: подтверждение функционала, отображенного в техническом задании.

Для планирования экспериментов необходимо обозначить факторы, влияющие на результат. К таким относятся:

- форма анализируемого сигнала;
- частота получаемой выборки сигнала;
- время анализа.

3.2.1 Эксперимент № 1: Определение разрешения анализа в верхних граница диапазона

Целью данного эксперимента является подтверждение высокой разрешающей способности разработанного ВП в верхней части диапазона

частот. А так же сравнение полученных результатов со стандартным ВП «Spectral Measurement» среды LabVIEW.

Для этого, с помощью виртуального генератора, была создана выборка, с частотой получения значений в 150000 в сек, соответствующая сумме двух синусоидальных сигналов с параметрами:

- сигнал 1:
 - частота 50101 Гц;
 - амплитуда 2,5В;
- сигнал 2:
 - частота 50111 Гц;
 - амплитуда 1 В.

Начальные условия анализа спектра:

- центральная частота 50000 Гц;
- полоса пропускания 2000 Гц;
- шаг дискретизации диапазона 1 Гц.

В первом случае время анализа было задано минимальным, и составляло 10 мс. При этом виртуальный прибор построил спектрограмму с большим размытием по частоте. Спектрограмма при времени анализа 10 мс приведена на рисунке 3.5.

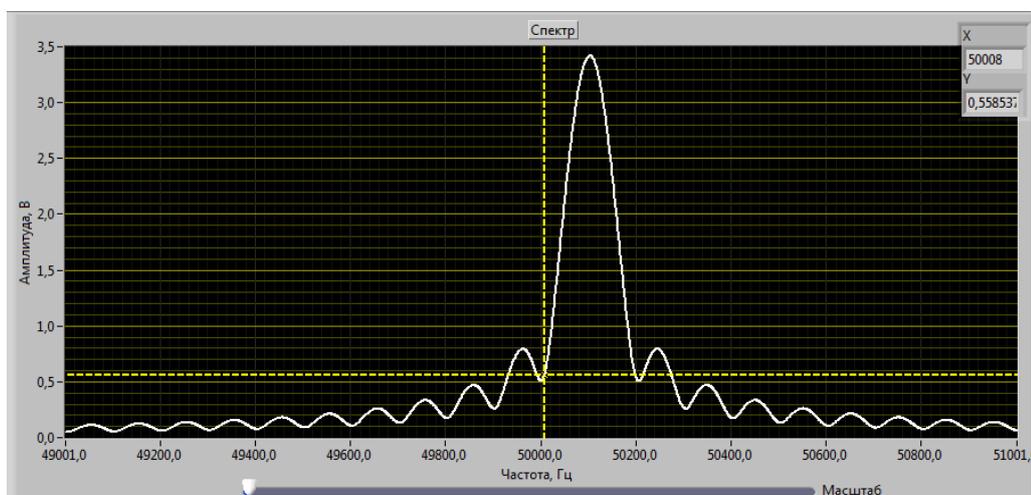


Рисунок 3.5 – Спектрограмма биения при времени анализа 10 мс

Как видно, спектрограмма построена не корректно. Это объясняется тем, что заданный сигнал имеет форму биения с периодом около 11 мс. При анализе мы считываем менее одного периода входного сигнала.

Воспользуемся реализованным функционалом, и увеличим время анализа до 100 мс, повысив точность определения спектра. Построенная спектрограмма, при времени анализа 100 мс приведена на рисунке 3.6.

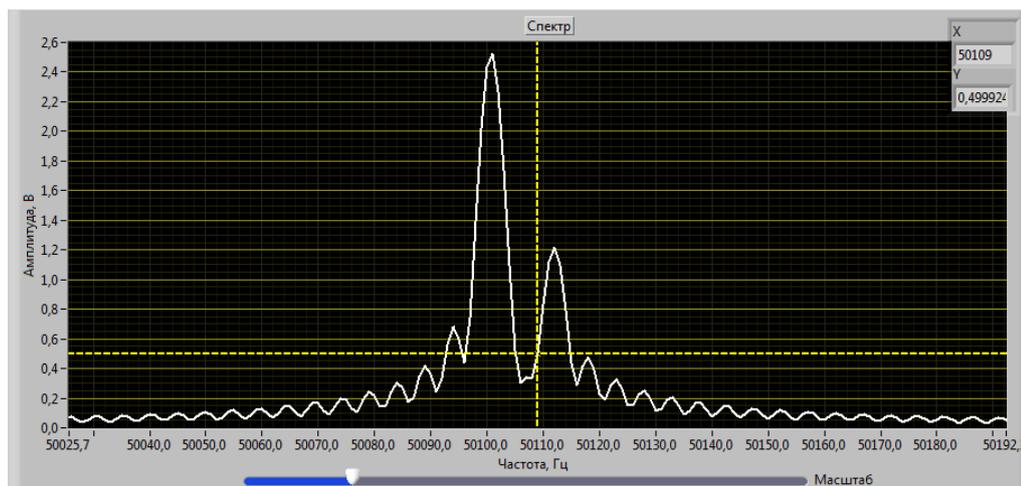


Рисунок 3.6 – Спектрограмма биения при времени анализа 100 мс

Данная спектрограмма построена корректно. Имеется две частотные составляющие соответствующие начальным условиям. Воспользовавшись масштабом оси частот можно подробнее рассмотреть спектрограмму, построенную на большом диапазоне.

Для определения численных значений гармоник зададим начальные условия по анализу: минимальная амплитуда 0,2 В и область отсечения 10 Гц (соответствует отсечению максимумов спектрограммы в диапазоне от минус 5 Гц до плюс 5 Гц от найденного экстремума). Результат анализа приведен на рисунке 3.7.

Минимальная амплитуда, В

0,2

Область отсекация ложных гармоник, Гц

10

Сохранить результат

OK

Частоты Гармоник, Гц

50101 50112 0 0 0

Амплитуды гармоник, В

2,52721 1,21738 0 0 0

Рисунок 3.7 – Оценённые гармоники

Найденные частоты гармоник в допуске по шагу дискретизации анализа (± 1 Гц). Абсолютная погрешность определения амплитуды первой гармоники составила 0,03 В, второй: 0,22 В. Погрешность при вычислении амплитуды второй гармоники объясняется тем, что при проведении анализа спектра первая гармоника ввиду близости по частоте оказывает существенное влияние на расчет.

Сравним полученные результаты со спектром на выходе стандартного ВП «Spectral Measurement» пакета LabVIEW. В настройках данного ВП было включено окно типа «Hamming». Результаты стандартного ВП приведены на рисунке 3.8.

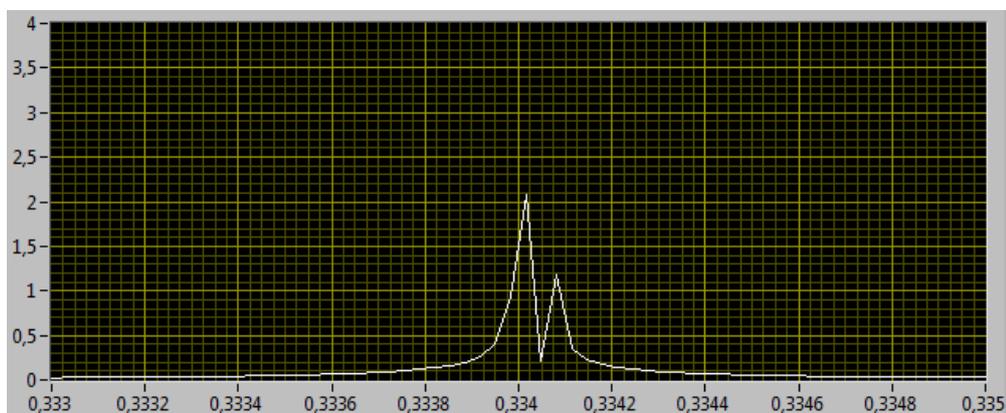


Рисунок 3.8 – Спектр биения стандартного ВП «Spectral Measurement»

Как видно амплитуда первой гармоники на спектре со стандартного ВП рассчитана не корректно и равна значению около 2,1 В, амплитуда второй гармоники близка к значению 1,2 В.

В данном эксперименте проанализирована разрешающая способность разработанного ВП в верхней части шкалы частот. Так же отмечено, что при увеличении времени анализа точность так же возрастает. По сравнению со стандартным ВП «Spectral Measurement» данные по амплитуде получены более корректные.

3.2.2 Эксперимент № 2: Определения спектра не периодических сигналов

Одним из преимуществ применения интеграла Фурье по сравнению с алгоритмами БПФ является возможность получения корректного спектра не периодического сигнала.

Цель эксперимента: оценить возможности построения спектров непериодических сигналов. Провести сравнение с результатами стандартного ВП.

Для возможности формирования одиночных импульсов в виртуальный под-прибор были внесены необходимые изменения, обнуляющие не интересующие на части выборки сигнала.

Для первого сигнала был выбран одиночный прямоугольный импульс длительностью $\tau = 0,1$ с и амплитудой $A = 5$ В.

Не периодический сигнал, как следует из главы 1, имеет сплошной спектр. Спектр одиночного прямоугольного импульса рассчитывается по формуле:

$$S(\omega) = A\tau \left| \frac{\sin \frac{\omega\tau}{2}}{\frac{\omega\tau}{2}} \right|. \quad (3.1)$$

Расчетный спектр прямоугольного импульса приведен на рисунке 3.9.

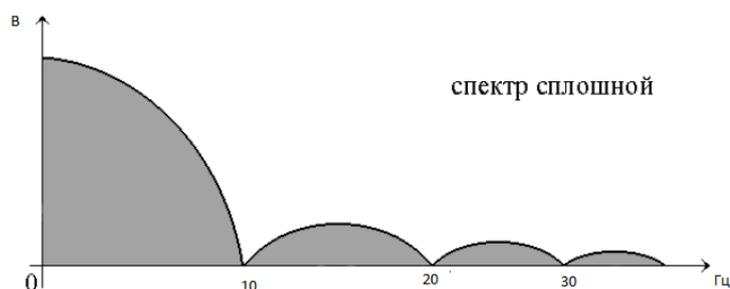
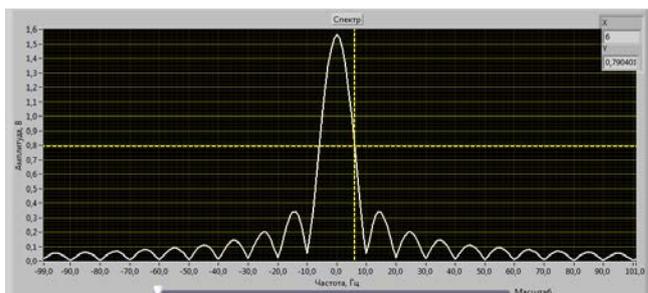
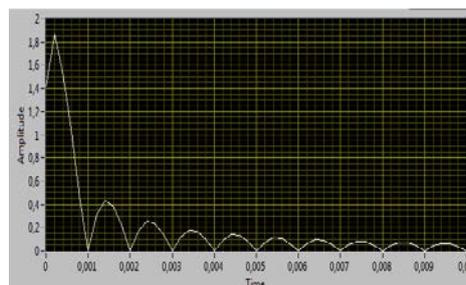


Рисунок 3.9 – Расчетный спектр прямоугольного импульса

Проведем анализ спектра в диапазоне от минус 100 до плюс 100 Гц, шаг дискретизации 1 Гц, время анализа 500 мс. Результат анализа отображен на рисунке 3.10.



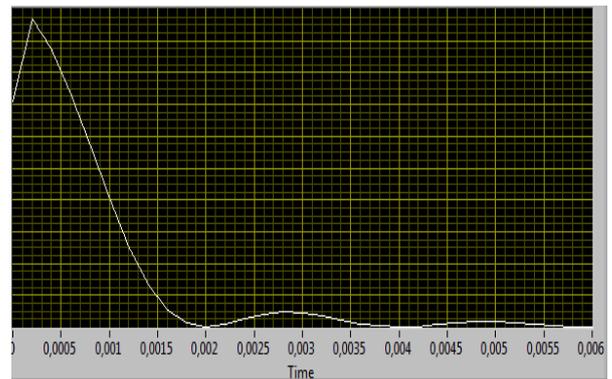
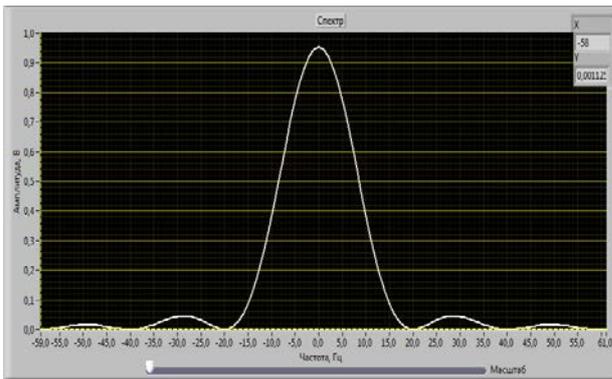
а) ВП «Анализатор спектра»



б) стандартный ВП

Рисунок 3.10 – Спектр прямоугольного импульса

Как видно по построенной спектрограмме частоты затухания вычислены корректно. При сравнении со спектрограммой, полученной стандартным ВП, можно отметить не корректное отображение спектра в начале шкалы частот. Аналогичные результаты были получены при анализе спектра треугольного импульса. Построенные спектрограммы изображены на рисунке 3.11.



б) ВП «Анализатор спектра»

б) стандартный ВП

Рисунок 3.11 – Спектр треугольного одиночного импульса

3.2.3 Эксперимент № 3: Определение спектра последовательности прямоугольных импульсов

Корректность работы ВП «Анализатор спектра» можно проверить, используя его для анализа сигналов сложной формы, спектр которых известен, и параметры спектра можно рассчитать математически. Первоначально выбрана периодическая последовательность прямоугольных импульсов. Такой сигнал характеризуется частотой, скважностью и амплитудой. Зная данные параметры, спектр может быть рассчитан по известным формулам.

Для данного эксперимента выбран сигнал с параметрами:

- амплитуда $A = 5$ В;
- частота $f = 500$ Гц;
- скважность 5.

Сигнал в нашем эксперименте, для удобства математического расчета симметричен относительно оси амплитуд, для этого в под-прибор, генерирующий выборку, установлена настройка смещения фазы сигнала на 36 градусов. Вид сигнала полученный ВП представлен на рисунке 3.12.

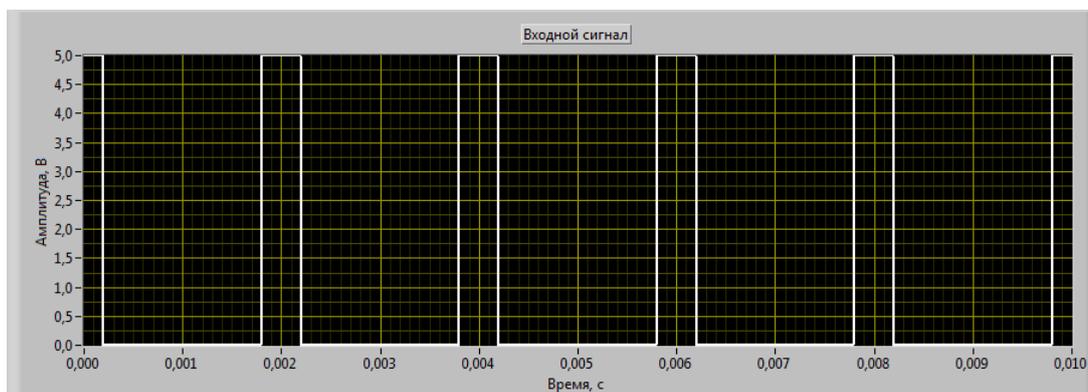


Рисунок 3.12 – Последовательность прямоугольных импульсов

Спектр данного сигнала рассчитывается по формуле:

$$S_n = \frac{2A}{\pi n} \cdot \left| \sin \left(n\pi \frac{\tau}{T} \right) \right|, \quad (3.2)$$

где S_n – амплитуда гармоники n ;

$\frac{\tau}{T}$ – скважность сигнала.

Анализ спектра проводился на диапазоне от 0 до 10000 Гц с разрешением анализа в 1 Гц. Расчетные значения по формуле (3.2) амплитуд гармонических составляющих в этом диапазоне приведены в таблице в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения спектра прямоугольного сигнала

Частота гармоники, Гц	0	500	1000	1500	2000	3000	3500	4000	4500
Амплитуда, В	2,000	1,871	1,514	1,009	0,468	0,312	0,432	0,378	0,208
Частота гармоники, Гц	5500	6000	6500	7000	8000	8500	9000	9500	
Амплитуда, В	0,170	0,252	0,233	0,134	0,117	0,178	0,168	0,098	

Определенная спектрограмма, построенная с помощью разработанного ВП «Анализатор спектра» приведена на рисунке 3.13.

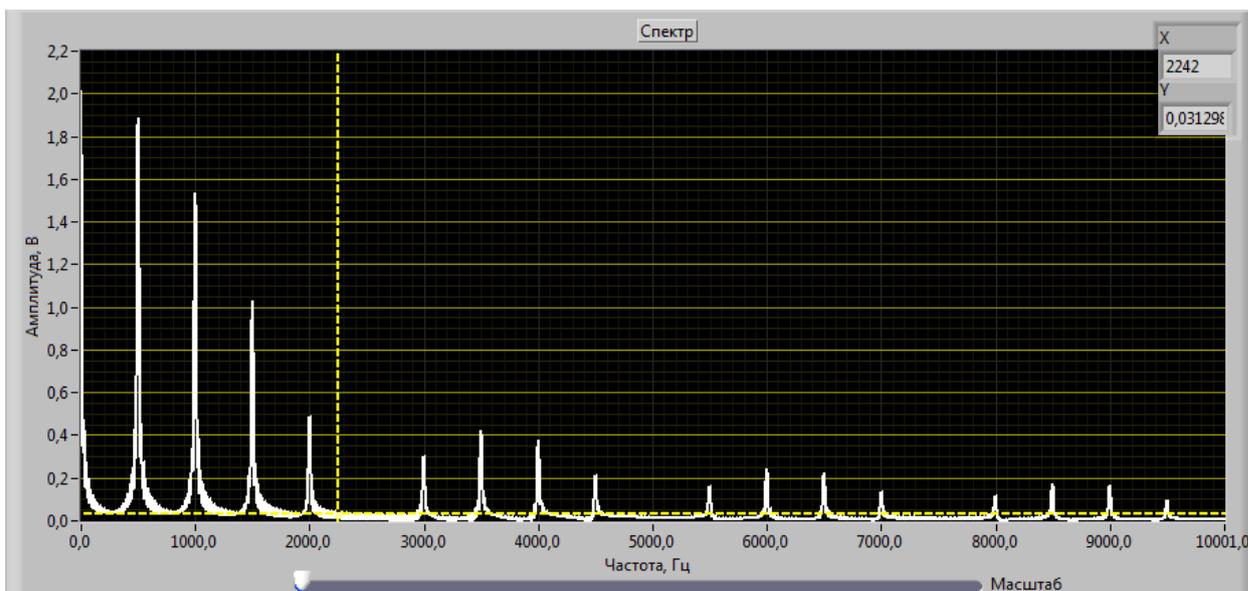


Рисунок 3.13 – Построенная ВП спектрограмма последовательности прямоугольных импульсов

Спектрограмма является полностью соответствующей для данного типа анализируемого сигнала. Мы видим постоянную составляющую и волнообразное затухание гармоник. Определенные виртуальным прибором, при значении минимальной амплитуды 0,1 В и области отсечения ложных составляющих в 100 Гц, значения гармоник приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Определенные ВП значения спектра

Частота гармоники, Гц	0	500	1000	1500	2001	2999	3499	3999	4499
Амплитуда, В	1,928	1,804	1,460	0,974	0,453	0,303	0,418	0,366	0,201
Частота гармоники, Гц	5501	6000	6501	7001	7999	8499	9000		
Амплитуда, В	0,165	0,245	0,226	0,130	0,114	0,174	0,164		

Как видно из таблицы 3.2 гармоника с частотой 9500 Гц в выгрузку не попала, так как не прошла по критерию по минимальному значению амплитуды. Погрешность при определении частоты гармоники соответствует заданному разрешению анализа в ± 1 Гц. Относительная погрешность при

определении амплитуды гармоник, для данного эксперимента, около 3,5 % для низких гармоник, с постепенным уменьшением до 2,5 % для более ВЫСОКИХ.

4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является обязательной частью магистерской диссертации, целью которого является проектирование и создание конкурентоспособных разработок, технологий, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Магистерская диссертация представляет собой разработку виртуального прибора анализатора спектра в среде LabVIEW для использования в будущем для образовательных целей программы ВУЗа. Функционал виртуального прибора заключается в считывании входного сигнала через физическое устройство DAQ NI USB-6251, подключенного к персональному компьютеру, построения спектра сигнала, проведение анализа и вычисление гармоник.

Задачами данного исследования являются:

- выявление потенциальных потребителей результатов исследования;
- оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение трудоемкости выполнения работы;
- планирование научно-исследовательских работ;
- разработка графика проведения научного исследования;
- определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

4.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Для того чтобы определить потенциальных потребителей результатов исследования необходимо рассмотреть целевой рынок и провести его

сегментирование.

Данный виртуальный анализатор спектра направлен на использование в научно-исследовательских институтах (НИИ) и учреждениях, занимающиеся проведением измерений электрических сигналов, а также их обработкой и анализом.

Предполагается использование разработанного прибора в ВУЗ для учебных целей на лабораторных занятиях, в аудиториях, которые не полностью укомплектованы нужными приборами для измерения электрических сигналов.

Анализатор спектра позволяет проводить исследование периодических и не периодических сигналов, частотой от 1 до $5 \cdot 10^4$ Гц. Таким образом подходит для широкого круга потребителей, исключая направления обучения радиоинженеров работающих с СВЧ диапазоном.

4.2 Организация и планирование научно-исследовательской работы

Для выполнения научного исследования была создана рабочая группа, в которую вошли научный руководитель (НР) и непосредственно инженер (И), выполняющий написание магистерской ВКР.

В данном подразделе был создан перечень работ и отдельных этапов в рамках проведения исследования, а также приведены исполнители по каждому виду работ. Данный перечень представлен в таблице 4.

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований и разработок.

По каждому виду запланированных работ установлена соответствующая должность исполнителей, эти данные представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Утверждение темы проекта	1	Постановка целей и задач, обзор вводной информации	НР – 100%, И – 10 %
	2	Утверждение темы проекта	НР – 100 %
	3	Анализ актуальности и новизны темы проекта	НР – 30 % И – 100 %
Выбор направления исследования	4	Подбор материалов по теме	НР – 10 % И – 100%
	5	Изучение материалов по теме	
	6	Выбор направления исследований	НР – 30 % И – 100 %
	7	Календарное планирование работ	
Исследования	8	Обзор литературы по теме	НР – 10 % И – 100 %
	9	Подбор нормативных документов	
	10	Анализ использующихся средств и методов	
	11	Систематизация и оформление информации	
	12	Проектирование	И - 100 %
Анализ полученных результатов	13	Обработка результатов, подведение итогов	НР – 30 % И – 100 %
	14	Составление пояснительной записки	И – 100 %
	15	Подготовка презентации	

4.3 Определение трудоемкости выполнения работ

Определение трудоемкости выполнения работ для каждого исполнителя является важным моментом, так как трудовые затраты чаще

всего являются основной частью стоимости проведенного исследования. Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер так как зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Ожидаемое (среднее) значение трудоемкости $t_{ожі}$ рассчитывали по формуле:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5} \quad (4.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемое значение трудоемкости выполнения работы, чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость заданной работы, чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость заданной работы, чел.-дн.

Исходя из полученных значений $t_{ожі}$, рассчитывается продолжительность каждого вида работы в рабочих днях T_p по формуле:

$$T_{pд} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_d \quad (4.2)$$

где $T_{pд}$ – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, примем $K_{вн} = 1$;

K_d коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_d = 1-1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

4.4 Разработка графика проведения научного исследования

В качестве графика проведения научного исследования использовалась диаграмма Ганта, так как она является наиболее наглядным и удобным способом построения ленточного графика.

Для удобства разработки графика необходимо перевести длительность каждого этапа работ из рабочих дней в календарные. Продолжительность выполнения работы в календарных днях T_{Ki} рассчитывается по формуле:

$$T_{Ki} = T_{РД} \cdot k_{кал} \quad (4.3)$$

где $k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности в свою очередь рассчитывается по формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} \quad (4.4)$$

где $T_{кал}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}$ – количество праздничных дней в году.

Согласно трудовому календарю России, в 2020 году при шестидневной рабочей неделе 300 рабочих дней, 66 выходных и праздничных дней.

$$k_{кал} = 366 / (366 - 66) = 1,22.$$

В таблице 5 приведены расчеты с учетом $K_{Д} = 1,1$. Рассчитаны рабочие и трудовые дни. На основе таблицы 5 построен календарный план-график (исполнители: НР – научный руководитель, И – студент). Календарный план-график представлен в таблице 6.

Таблица 5 – Трудозатраты на выполнение проекта

Номер этапа	Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.- дн.			
						$T_{РД}$		$T_{КД}$	
			t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
1	Постановка целей и задач, обзор вводной информации	НР, И	2	4	2,8	3,1	0,3	3,8	0,4
2	Утверждение темы проекта	НР	2	4	2,8	3,1		3,8	
3	Анализ актуальности и новизны темы проекта	НР, И	2	4	2,8	0,9	3,1	1,1	3,8
4	Подбор материалов по теме	НР, И	3	5	3,8	0,4	4,2	0,5	5,1
5	Изучение материалов по теме	НР, И	6	10	7,6	0,8	8,4	1,0	10,2
6	Выбор направления исследований	НР, И	7	9	7,8	2,6	8,6	3,1	10,5
7	Календарное планирование работ	НР, И	3	6	4,2	1,4	4,6	1,7	5,6
8	Обзор литературы по теме	НР, И	8	10	8,8	1,0	9,7	1,2	11,8
9	Подбор нормативных документов	НР, И	5	8	6,2	0,7	6,8	0,8	8,3
10	Анализ используемых средств и методов	НР, И	2	3	2,4	0,3	2,6	0,3	3,2
11	Систематизация и оформление информации	НР, И	3	4	3,4	0,4	3,7	0,5	4,6
12	Проектирование	И	10	15	12		13,2		16,1
13	Обработка результатов, подведение итогов	НР, И	2	5	3,2	1,1	3,5	1,3	4,3
14	Составление пояснительной записки	И	8	9	8,4		9,2		11,3
15	Подготовка презентации	И	3	4	3,4		3,7		4,6
	Итого:				79,6	15,6	81,7	19,1	99,7

Таблица 6 – Календарный план-график

Этап	НР	С	Март			Апрель				Май			Июнь	
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	
1	3,8	0,4	■											
2	3,8			■										
3	1,1	3,8			■									
4	0,5	5,1				■								
5	1,0	10,2					■							
6	3,1	10,5						■						
7	1,7	5,6							■					
8	1,2	11,8								■				
9	0,8	8,3									■			
10	0,3	3,2										■		
11	0,5	4,6											■	
12		16,1												■
13	1,3	4,3												■
14		11,3												■
15		4,6												■

НР – ■; И – ■

4.5 Определение бюджета научно-технического исследования

Планируя бюджет научно-технического исследования (НТИ), необходимо обеспечить достоверное и полное отражение всех видов расходов, которые связаны с его выполнением. Для определения бюджета НТИ в рамках выполнения ВКР с учетом выбранного направления исследования и исполнителей работ были рассчитаны следующие виды затрат:

- материальные затраты НТИ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

4.5.1 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

В рамках расчета материальных затрат НТИ должны быть учтены:

- приобретаемые сырье и материалы, необходимые для создания продукции;
- покупаемые материалы, необходимые для поддержания нормального технологического процесса;
- затраты на дополнительные комплектующие;
- сырье, материалы, различные комплектующие изделия, применяемые в качестве объектов исследования;
- затраты на канцелярские принадлежности.

Так как исследование в рамках выполнения ВКР включает в себя лишь аналитический обзор, а также использование определенного метода на конкретном примере, то оно предусматривает затраты лишь на канцелярские принадлежности. А именно, в ходе выполнения работы была приобретена пачка бумаги формата А4 и заправлен картридж для принтера.

Материальные затраты Z_M на i -й материальный ресурс рассчитывается по формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m (C_i \cdot N_{расxi}), \quad (4.5)$$

где k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы;

m – количество видов материальных ресурсов, используемых для выполнения научного исследования;

C_i – цена на приобретение материального ресурса;

$N_{расxi}$ – количество материального ресурса, которое планируется для использования при выполнении научного исследования.

Значения цен были взяты на основании чеков после приобретения соответствующего вида продукции.

После проведения расчетов материальных затрат результаты отображены в таблице 7.

Таблица 7 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, с учетом $k_T=10\%$ руб.
Заправка картриджа	шт.	1	300,00	330,00
Пачка бумаги формата А4	шт.	2	500,00	550,00
Итого:				880,00

4.5.2 Расчет заработной платы основных исполнителей проекта

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера (в его роли выступает исполнитель проекта), а также премии, входящие в фонд заработной платы. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

Среднедневная тарифная заработная плата ($ЗП_{\text{дн-т}}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = MO/25 \quad (4.6)$$

учитывающей, что в году 300 рабочих день и, следовательно, в месяце в среднем 25 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчет заработной платы приведен в таблице 8. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 5.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{дон.ЗП}} = 1,188$; $K_p = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_u = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699$.

Таблица 8 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33 664	1346,56	16	1,699	36604,89
И	15 470	616,75	82	1,699	85924,38
Итого:					122529,27

4.5.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е. $C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3$. Итак, в нашем случае $C_{\text{соц.}} = 122529,27 \cdot 0,3 = 36758,78$ руб.

4.5.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об.}} \cdot t_{\text{об.}} \cdot Ц_{\text{Э}} \quad (4.7)$$

где $P_{\text{об.}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_{\text{Э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об.}}$ – время работы оборудования, час.

Расчет затрат на электроэнергию при цене 6,59 руб. за кВт/ч приведен в таблице 9.

Таблица 9 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{об.}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{об.}}$, кВт	Затраты $Э_{\text{об.}}$, руб.
Персональный компьютер	549*0,7=384,3	0,3	759,76
МФУ	32	0,1	21,09
Итого:			780,85

4.5.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

$$C_{\text{ам}} = \frac{N_{\text{А}} * Ц_{\text{об}} * t_{\text{рф}} * n}{F_{\text{д}}}, \quad (4.8)$$

где $N_{\text{А}}$ – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$Ц_{\text{об}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она

может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

F_D – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} .

$t_{pф}$ – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Проведем расчеты амортизации оборудования. Стоимость ПК 50000 руб., время использования 549 часов, тогда для него:

$$C_{AM}(ПК) = (0,4 * 50000 * 549 * 1) / 2400 = 4575,00 \text{ руб.}$$

Стоимость МФУ 20000 руб., его $F_D = 700$ час.; $N_A = 0,5$; $t_{pф} = 32$ часа, тогда его:

$$C_{AM}(МФУ) = (0,5 * 20000 * 32 * 1) / 700 = 250 \text{ руб.}$$

Итого начислено амортизации 4 825,00 руб.

4.5.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{проч.} = (C_{мат} + C_{зп} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам}) \cdot 0,1$$

Проведем расчет прочих расходов:

$$\begin{aligned} C_{проч.} &= (880,00 + 122529,27 + 36758,78 + 780,85 + 4825,00) \cdot 0,1 = \\ &= 16577,39 \text{ руб.} \end{aligned}$$

4.5.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Разработка виртуального прибора «Анализатор спектра»

Таблица 10 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	880,00
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	122529,27
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	36758,78
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	780,85
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	4825,00
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	16577,39
Итого:		182 351,29

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 182\ 351,29$ руб.

4.5.8 Расчет прибыли

Прибыль по проекту заложена на уровне 15%. Таким образом прибыль по проекту равна 27352,69 руб.

4.5.9 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли.

Проведем расчет:

$$\text{НДС} = (182\ 351,29 + 27352,69) * 0,2 = 41940,79 \text{ руб.}$$

4.5.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС. Проведем расчет цены проекта:

$$C_{\text{НИР}}(\text{КР}) = 182351,29 + 27352,69 + 41940,79 = 251644,77 \text{ руб.}$$

4.6 Оценка научно-технической эффективности исследования

В рамках эффективности исследования стоит отметить научную значимость. Научно-технический уровень характеризует влияние проекта на уровень и динамику обеспечения научно-технического прогресса в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям. На ее основе делается вывод о целесообразности НИР.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется интегральный показатель (индекс) ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i,$$

где $K_{НТУ}$ – интегральный индекс научно-технического уровня;

R_i – весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта (таблица 11);

n_i – количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах (таблицы 11 – 13 содержат критерии оценки рассматриваемых признаков).

Таблица 11 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признаки научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИР	R_i
Уровень новизны	Систематизируются и обобщаются сведения, определяются пути дальнейших исследований	0,4
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,1
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,5

Таблица 12 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны – n_1	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8 – 10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5 – 7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2 – 4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 13 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов – n_2	Баллы
Установка закона, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6
Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 14 – Возможность реализации результатов по времени

Время реализации – n_3	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Результаты оценок признаков научно-технического уровня приведены в таблице 15 .

Таблица 15 – Количественная оценка признаков НИР

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИР	Выбранный балл	
Уровень новизны	Новая	6	Разработка приложения к развивающемуся направлению науки и техники
Теоретический уровень	Элементарный анализ связей между фактами	6	Разработка алгоритма сравнения для поиска оптимального решения.
Возможность реализации	В течение первых лет	10	Быстрое внедрение и переход к эксплуатации

Баллы по параметрам времени и масштабам реализации при расчете складываются.

Исходя из оценки признаков НИР, показатель научно-технического уровня для данного проекта составил:

$$K_{\text{нту}} = 0,4 \cdot 6 + 0,1 \cdot 6 + 0,5 \cdot 10 = 8.$$

Таким образом, исходя из данных в таблице 16, данный проект имеет высокий уровень научно-технического проекта.

Таблица 16 – Качественные уровни НИР

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

Выводы по разделу

При разработке научно-технического проекта были определены основные и требуемые технико-экономические показатели, такие как количество исполнителей, сроки и продолжительность исполнения, себестоимость программного продукта и эффективность проекта в целом. При планировании и организации НИР составлен перечень работ,

необходимых для достижения поставленной цели. По предварительным расчетам себестоимость продукта составила 251644,77 рубля. В результате оценки научно-технической эффективности проекта был сделан вывод о высоком уровне эффективности.

5 Социальная ответственность

В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с организацией рабочего места и условий, в которых проводилась разработка программного анализатора спектра. Учтены вредные факторы, оказывающие негативное влияние на организм человека, как электромагнитное излучение, неоптимальный микроклимат помещения, недостаточность освещения, поражение электрическим током. Так же указан характер вредного воздействия данных факторов на организм и последствия их длительного и чрезмерного воздействия. Приведен расчет освещенности рабочего места.

В разделе проанализированный возможные ЧС, возможные на рабочем месте. Описаны мероприятия, благодаря которым можно повысить производительность труда и улучшить условия работы в лаборатории.

Рабочее место расположено в кабинете № 2 Поверочной лаборатории Ванкорского производственного участка метрологии ООО ИК «СИБИНТЕК». Рабочая зона состоит из персонального компьютера, рабочего стола, офисного кресла. Работа производится сидя, при небольшом физическом напряжении.

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Нормы трудового законодательства

В соответствии с трудовым кодексом РФ, а так же нормами организации работ вахтовым методом, трудовой распорядок предусматривает [36]:

- длительность рабочей смены не более 11 часов;
- установление двух регламентируемых перерывов (15 минут после 2 часов работы);
- обеденный перерыв 1 час.

При трудоустройстве, а после ежегодно, сотрудники проходят обязательные медосмотры.

При приеме на работу сотрудники проходят вводный инструктаж. При поступлении на рабочее место сотрудникам проводятся первичные инструктажи противопожарный и по охране труда. Далее каждый квартал проводятся повторные инструктажи. Сотрудник должен быть обучен и сдать экзамены по правилам электробезопасности, охране труда по профессии, оказанию первой помощи, а так же пожарно-технический минимум.

Предприятие обеспечивает рабочий персонал всеми необходимыми средствами индивидуальной защиты, проводит специальную оценку условий труда.

Государственный надзор и контроль над соблюдением трудового законодательства в организациях независимо от организационно-правовых форм и форм собственности осуществляют специально уполномоченные на то государственные органы и инспекции в соответствии с федеральными законами. Согласно трудовому кодексу РФ:

- количество часов за отчетный период (1 год) не должно превышать норму времени [36];
- во время регламентированных перерывов целесообразно выполнять комплексы физических упражнений и осуществлять проветривание помещений [45].

Государственный контроль и надзор в организациях на предмет соблюдения существующих правил и норм осуществляют специализированные органы, такие как:

- Государственная инспекция труда (Роструд);
- Государственная экспертиза условий труда (комитет по труду и занятости населения);
- Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Роспотребнадзор).

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Рабочая зона состоит из персонального компьютера, рабочего стола, офисного кресла. Работа производится сидя, при небольшом физическом напряжении. Кабинет №2 обладает площадью 30 м², высота потолков 3 м, в кабинете находится 3 рабочих места.

Обработка полученной информации с прибора и её визуализация производится на компьютере, состоящем из системного блока и монитора, поэтому выполняемые работы сводятся к взаимодействию с персональным компьютером.

Одно рабочее место пользователя персонально электронно-вычислительной машиной (ПЭВМ) должно иметь площадь не менее 6 м². При использовании персональных компьютеров на рабочем месте нужно учитывать расстояние между рабочими столами с мониторами. Рабочие места с ПЭВМ не должны быть расположены вблизи силовых кабелей и вводов, технологического оборудования, создающего помехи в работе ПЭВМ.

Конструкция рабочей мебели должна предусматривать возможность регулировки в соответствии с индивидуальными особенностями пользователя для создания комфортных условий для выполнения работы. Вокруг ПК должно быть обеспечено свободное пространство в радиусе как минимум от 60 до 120 см.

Поверхность пола не должна быть скользкой, она должна представлять собой ровную и удобную для влажной уборки поверхность. Также поверхность должна иметь антистатические свойства [37].

В местах для подключения к электрической сети переносных электроприемников тока выполняются надписи, указывающие напряжение сети и род тока [38].

5.2 Производственная безопасность

Выделяются следующие вредные и опасные производственные факторы, они приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Разрабо тка	Эксплу тация	Нормативные документы
Вредные			
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	параметры микроклимата устанавливаются СанПиН 2.2.4-548-96 [4]; Требования по электробезопасности устанавливаются ГОСТ Р 12.1.019-2009 [5] Требования к естественному и искусственному освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 [6]
2. Повышенный уровень электромагнитных излучений	+	+	
3. Недостаток естественного освещения, недостаточная освещенность рабочей зоны;			
Опасные			
4.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

5.3 Анализ вредных производственных факторов

5.3.1 Отклонение показателей микроклимата

К параметрам микроклимата относятся: температура воздуха, температура поверхностей, относительная влажность воздуха, скорость движения воздуха. Оптимальные значения этих характеристик зависят от сезона (холодный, тёплый), а также от категории физической тяжести работы. Для инженера метролога она является лёгкой, так как работа проводится сидя, без систематических физических нагрузок.

Согласно требованиям, оптимальные и допустимые параметры

микроклимата в офисах приведены в таблицах 18 и 19.

Таблица 18 – Оптимальные значения характеристик микроклимата

Период год	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	от 22 до 24	от 21 до 25	от 40 до 60	0,1
Тёплый	от 23 до 25	от 22 до 26	от 40 до 60	

Таблица 19 – Допустимые показатели микроклимата

Период года	Температура воздуха, °С		Отн. вл. воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин
Теплый	от 21,0 до 22,9	от 24,1 до 25,0	от 15 до 75	0,1	0,2
Холодный	от 20,0 до 21,9	25,1 до 28,0		0,1	

Для создания благоприятных условий труда и повышения производительности, необходимо поддерживать оптимальные параметры микроклимата производственных помещений. Для этого должны быть предусмотрены следующие средства: центральное отопление, вентиляция (искусственная и естественная), искусственное кондиционирование [39].

5.3.2 Повышенный уровень электромагнитных излучений

При работе с компьютером пользователь находится в непосредственной близости к монитору, что вызывает воздействие электромагнитных полей (ЭМП). Вредное влияние переменных магнитных полей должно быть учтено при организации рабочего места с персональными электронно-вычислительными машинами (ПЭВМ).

Когда на человека воздействуют поля, напряженность которых выше допустимой нормы, то возникают нарушения нервной, сердечно-сосудистой системы и некоторых биологических показателей крови.

Работа проводилась на современном компьютере, где значения электромагнитного излучения малы и отвечают требованиям, которые

приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Временно допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах.

Наименование параметров		ВДУ
Напряженность электрического поля	в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц	25 В/м
	в диапазоне частот от 2 кГц до 400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока	в диапазоне частот от 5 Гц до 2 кГц	250 нТл
	в диапазоне частот от 2 кГц до 400 кГц	25 нТл
Напряженность электростатического поля		15 кВ/м

Для обеспечения нормальной деятельности пользователя с учетом норм предельно допустимой напряженности ЭМП экран монитора должен находиться на расстоянии от 0,6 до 0,7 м, но не ближе, чем 0,5 м от глаз.

5.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Увеличение освещенности рабочей поверхности до определенного предела повышает остроту зрения, то есть способность глаз отдельно воспринимать две точки, расположенные на некотором расстоянии одна от другой. При неудовлетворительном освещении снижается производительность труда и увеличивается количество допускаемых метрологом ошибок.

Работа подразумевает зрительный тип работы, поэтому организация правильного освещения имеет значительное место. Пренебрежение данным фактором может привести к профессиональным болезням зрения.

В рабочем помещении необходимо естественное освещение (через окна) и искусственное освещение (использование ламп при недостатке естественного освещения).

Светильники в помещении должны располагаться равномерно по площади потолка, тем самым обеспечивая равномерное освещение рабочих

мест.

Разряд зрительных работ инженера-метролога относится к разряду III подразряду Г (высокой точности), параметры искусственного освещения указаны в таблице 20.

Таблица 20 – Нормативные значения освещённости

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Норма освещённости, лм
Высокой точности	От 0,3 до 0,5	III	Г	Средний и большой	Светлый << средний	400 (в том числе от общего 200)

Проведем расчёта общего равномерного освещения горизонтальной рабочей поверхности. Параметры рабочего кабинета: ширина 5 метров, длина 6 метров, высота потолков 3 метра. В кабинете расположено 5 потолочных светильников для фальш-потолка «Армстронг» с 4 люминесцентными лампами в каждом. Для расчета используем метод светового потока, учитывающий световой поток, отражённый от потолка и стен. Расчётный световой поток, лм, группы светильников с люминесцентными лампами рассчитывается по формуле (5.1). [47]

$$\Phi_{\text{л.расч}} = \frac{E_n * S * Z * K}{N * n * \eta} \quad (5.1)$$

где E_n – нормированная минимальная освещённость, лк;

S – площадь кабинета (30 м²);

Z – коэффициент минимальной освещённости; $Z = 1,15$ для люминесцентных ламп;

K – коэффициент запаса (для люминесцентных ламп $K = 1,1$);

N – число светильников;

n – количество ламп в светильнике;

η - коэффициент использования светового потока ламп.

Коэффициент использования светового потока является табличной характеристикой, и зависит от типа ламп, коэффициентов отражения светового потока от стен ρ_c и потолка ρ_n и индекса помещения. Стены помещения выкрашены в светлые тона, потолок светло серый. Для таких условий коэффициенты принимаются $\rho_c = 70\%$, $\rho_n = 50\%$. [47]

Вычислим индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{30}{3*11} = 0,91 \quad (5.2)$$

где S – площадь кабинета;

h – высота кабинета;

A, B – длина и ширина.

Для найденных i и коэффициентов отражения, а так же типу светильников найдем значение $\eta=46\%$, по табличным данным [47].

Вычислим расчетный световой поток для одной лампы:

– для $E_n=200$ лм,

$$\Phi_{\text{л.расч}} = \frac{200*30*1,15*1,1}{5*4*0,46} = 825 \text{ лм.}$$

– для $E_n=400$ лм,

$$\Phi_{\text{л.расч}} = \frac{400*30*1,15*1,1}{5*4*0,46} = 1650 \text{ лм.}$$

Световой поток от люминесцентной лампы Philips Osram L 18W/765 составляет 1050 лм. Таким образом, можно сделать вывод, о том, что для общего освещения световой поток соответствует норме. Однако необходимо использовать дополнительный источник света, для соответствия полным нормам.

Проведем анализ естественного освещения. Высота от рабочей

поверхности до верха окна равна $H=1,7$ м. В кабинете расположено два окна с тройным остеклением, в спаренных переплетах, расположенных на юг.

Определяем нормированное значение коэффициента естественной освещенности:

$$e_N = e_H \cdot m_N, \quad (5.3)$$

где e_H – значение коэффициента естественной освещенности (для требуемой точности работ, при комбинированной освещенности 1,2);
 m_N – коэффициент светового климата (для третьей группы административных районов, с окнами на юг 1). [41]

$$e_N = 1,2.$$

Коэффициент запаса для помещений с нормальными условиями среды $K_3 = 1,3$.

Световая характеристика проемов при $A/B=0,83$ и $B/H=3,52$ составит $\eta_0 = 23\%$. [48]

Общий коэффициент светопропускания рассчитывается как: [48]

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4 = 0,47 \quad (5.4)$$

где $\tau_1 = 0,75$ (для тройного остекления);

$\tau_2 = 0,7$ (для спаренного переплета);

$\tau_3 = 0,9$ (для несущих конструкций – стальных ферм);

$\tau_4 = 1$;

Средневзвешенный коэффициент отражения пола, стен и потолка составит: [48]

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_{\text{п}} \cdot S_{\text{п}} + \rho_{\text{ст}} \cdot S_{\text{ст}} + \rho_{\text{с}} \cdot S_{\text{с}}}{S_{\text{п}} + S_{\text{ст}} + S_{\text{с}}} = \frac{0,5 \cdot 30 + 0,5 \cdot 30 + 0,7 \cdot 51}{30 + 30 + 51} = 0,59 \quad (5.5)$$

Коэффициент для полученных параметров составит $r_1 = 3,1$. [48]

Перед зданием нет соседних, поэтому коэффициент перекрытия

светового потока принимаем равным единице. [48]

Площадь световых проемов при боковом освещении определяется как: [48]

$$S = \frac{S_{\text{п}} \cdot e_N \cdot K_3 \cdot \eta_0}{100 \cdot \tau_0 \cdot r_1} = \frac{30 \cdot 1,2 \cdot 1,3 \cdot 23}{100 \cdot 0,47 \cdot 3,1} = 7,39 \text{ м}^2. \quad (5.6)$$

Фактические размеры окон 2,2 м на 1,7 м. Таким образом, имеем суммарную площадь в 7,48 м². Естественная освещенность на рабочем месте соответствует нормам.

5.3.4 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Источником повышенной напряженности электромагнитного поля при данном виде работ является персональный компьютер.

Длительное воздействие электромагнитных полей промышленной частоты (50 Гц) приводит к расстройствам в головном мозге и центральной нервной системе. У человека могут наблюдаться головная боль в височной и затылочной областях, вялость, ухудшение памяти, боли в области сердца, угнетенное настроение, апатия, своеобразная депрессия с повышенной чувствительностью к яркому свету и интенсивному звуку, расстройство сна, сердечно-сосудистой системы, органов пищеварения, дыхания, повышенная раздражительность. Могут наблюдаться функциональные нарушения в центральной нервной системе, а также изменения в составе крови.

Воздействие постоянного магнитного поля (ПМП) и с частотой 50 Гц на человека проявляется в индицировании в теле человека вихревых токов. При длительном систематическом воздействии могут возникнуть изменения функционального состояния нервной системы, иммунной системы и сердечно-сосудистой системы. Длительное воздействие ЭМП промышленной частоты может спровоцировать и онкологические заболевания.

Для уменьшения уровня электромагнитного поля от персонального компьютера рекомендуется включать в одну розетку не более двух компьютеров, сделать защитное заземление, подключать компьютер к

розетке через нейтрализатор электрического поля.

Для понижения уровня напряженности электромагнитного поля следует использовать мониторы с пониженным уровнем излучения, устанавливать защитные экраны, устранять неисправности. А для профилактики компьютерного зрительного синдрома, улучшения визуальных показателей видеомониторов, повышения работоспособности, снижения зрительного утомления возможно применение защитных очков со спектральными фильтрами, разрешенных Минздравом России для работы с персональным компьютером.

На рабочем месте инженера используются мониторы с пониженным уровнем излучения и защитные очки, таким образом, рабочее место соответствует нормам СанПиН 2.2.4.3359-16 [42].

5.3.5 Психофизиологические факторы

Психофизиологическими и вредными факторами являются: напряжение зрения и внимания; монотонность труда.

Влияние выше приведенных факторов приводит к утомлению и снижению работоспособности. Появление и развитие утомления вызывает изменения в центральной нервной системе человека, а также может привести к различным заболеваниям.

5.4 Анализ опасных факторов

Поражение электрическим током. Причины поражения электрическим током: прикосновение к незаизолированным проводам, к металлическим частям компьютера, которые в результате повреждения изоляции находятся в напряжении; использование неисправных электроприборов; одновременное прикосновение к двум проводам, которые находятся под напряжением.

В зависимости от силы тока реакция на организм может быть различной: от слабо ощутимых воздействий, судорог до глубоких ожогов. В случае повреждения электрическим током необходимо прекратить действия

тока на пострадавшего, оценить состояние дыхательной и сердечно-сосудистой системы, при отсутствии пульса принять меры первичной реанимации и при любых повреждениях вызвать скорую помощь.

Повышенный уровень статического электричества. Источниками статического электричества в помещении являются компьютеры, оргтехника, электроприборы. У компьютера основным источником является экран монитора. Согласно СанПин 2.2.2/2.4.1340-03 допустимый уровень электростатического потенциала монитора 500 В [37]. Длительное воздействие статическое электричество влияет: на сердечно-сосудистую систему организма человека, центральную нервную систему. Чтобы защититься от воздействия статического поля необходимо делать влажную уборку в кабинете, увлажнять воздух, проветривать помещение, обязательно необходимо заземлять всю технику.

Короткое замыкание – это соединения двух точек электрической цепи, в результате которого возникает сильный ток, что приводит к возгоранию или выходу электрического прибора из строя. Во избежание повреждения изоляции проводов и возникновения коротких замыканий не следует вешать что-либо на провода, закрашивать и белить шнуры и провода, закладывать провода и шнуры за батареи, выдергивать штепсельную вилку из розетки за шнур, усилие должно быть приложено к корпусу вилки.

Мероприятия защиты при электробезопасности следующие:

- перед началом работы проверить исправность электропроводки, розеток и вилок компьютера, заземление компьютера;
- чистка компьютера должна производиться без напряжения;
- работать за компьютером следует с сухими руками;
- при аварийных ситуациях необходимо сразу отсоединить компьютер от сети;
- не вступать в контакт с оголенным проводом;
- проверка знаний правил безопасности и инструкций в

соответствии с выполняемой работой.

5.5 Экологическая безопасность

С развитием науки и техники окружающая среда подвергается различным антропогенным воздействиям: электромагнитные поля, выбросы углекислого и прочих газов и др. Многочисленные источники загрязнения наносят серьезный ущерб окружающей среде.

Таким образом, охрана окружающей среды является важным фактором при проектировании и проведении исследования.

При рассмотрении влияния ПЭВМ можно сказать, что пагубного воздействия на экологию не оказывается.

В помещении нет отходов, которые нуждаются в специальной утилизации, кроме люминесцентных ламп, которые уничтожаются, согласно Постановлению Правительства РФ от 03.09.2010 N 681.

В случае выхода из строя ПЭВМ, они списываются и отправляются на специальный склад, который при необходимости принимает меры по утилизации списанной техники и комплектующих.

5.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

В помещениях с электрическими приборами повышен риск возникновения пожара. Неисправность электрооборудования, освещения, неправильная их эксплуатация, наличие статического электричества неудовлетворительный надзор за пожарными устройствами может послужить причиной пожара. Пожар наносит большой материальный ущерб и часто сопровождается несчастными случаями с людьми.

Пожарная профилактика представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасности людей, на предотвращении пожара, ограничение его распространения, а также создание условий для успешного тушения пожара.

Для профилактики пожара чрезвычайно важна правильная оценка пожароопасной здания, определение опасных факторов и обоснование способов и средств пожар предупреждения и защиты.

Одно из условий обеспечения пожаробезопасности - ликвидация возможных источников воспламенения.

Обогрев помещений лаборатории осуществляется электрическими нагревателями со встроенными термостатами. Для предотвращения пожароопасных ситуаций необходимо строго соблюдать правила эксплуатации:

- не использовать нагреватели с неисправными, поврежденными проводами или термостатом;
- не располагать ближе, чем 0,5 метра от нагревателя, мебель из горючих материалов;
- не накрывать электронагреватель и не сушить на них одежду и ветошь.

Своевременно производится осмотр всех электрических машин на предмет нарушения изоляции и корректности работы на холостом ходу. Информация об осмотре заносится в журнал. В помещении лаборатории расположены первичные средства пожаротушения – огнетушители порошковые ОП-5, пожарные краны и рукава.

В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо эвакуироваться вслед за сотрудниками по плану эвакуации и ждать приезда специалистов, пожарников. При возникновении пожара должна сработать система пожаротушения, издав предупредительные сигналы, и передав на пункт пожарной станции сигнал о ЧС, в случае если система не сработала, по каким-либо причинам, необходимо самостоятельно произвести вызов пожарной службы по телефону 77701, сообщить место возникновения ЧС и ожидать приезда специалистов.

На рисунке 5.1 представлен план эвакуации при возникновении пожара и других ЧС.



Рисунок 5.1 – План эвакуации

5.7 Предотвращение распространения эпидемий

Коронавирусы – обширное семейство вирусов, которые поражают людей и животных. Известно, что некоторые из них способны вызывать у человека респираторные инфекции в диапазоне от обычной простуды до более серьезных состояний. Последний из недавно открытых коронавирусов вызывает заболевание COVID - 19. До вспышки инфекции в китайской провинции Ухань в декабре 2019 года о новом вирусе и заболевании ничего не было известно.

Он передается главным образом воздушно-капельным путем в результате вдыхания капель, выделяемых из дыхательных путей больного, например при кашле или чихании, а также капель слюны или выделений из носа. Также он может распространяться, когда больной касается любой

загрязненной поверхности, например дверной ручки. В этом случае заражение происходит при касании рта, носа или глаз грязными руками [46].

В целях предупреждения распространения коронавирусной инфекции, вызванной 2019-nCoV в поверочной лаборатории реализованы следующие мероприятия:

- организовано выполнение качественной уборки помещений с применением дезинфицирующих средств вирулицидного действия с обязательной обработкой каждые 2 часа дверных ручек, выключателей, поручней, перил, контактных поверхностей (столов и стульев работников, оргтехники), мест общего пользования (комнаты приема пищи, отдыха, туалетных комнат) во всех помещениях;
- обеспечено наличие 5-дневного запаса дезинфицирующих средств, а также средств индивидуальной защиты органов дыхания (маски, респираторы), в случае выявления работников с респираторными симптомами;
- обеспечено ежедневное измерение температуры тела работников бесконтактным способом, работников с повышенной температурой тела или имеющих респираторные симптомы необходимо немедленно отправить в медицинское учреждение.

Выводы по разделу

В данном разделе рассмотрены вопросы, с организацией рабочего места и условий, в которых производится разработка виртуальных приборов, описаны организационные условия труда, производственная санитария, охрана труда и окружающей среды.

Изучено влияние различных вредных и опасных факторов, влияющих на инженера: значения показателей микроклимата и электромагнитных излучений оказались в пределах установленных норм, что говорит о безопасности рабочего места для человека. Проведен расчет освещенности

рабочего места, для естественного и искусственного освещения. Расчет показал, что условия в кабинете полностью соответствуют нормам при комбинированном освещении, однако при отсутствии естественного освещения в вечерний период есть необходимость установки дополнительных настольных ламп.

Анализ выявленных факторов ЧС помещений поверочной лаборатории показал, что требования электробезопасность, пожаробезопасность и экологическая безопасность соблюдены и полностью соответствуют нормам.

Заключение

В ходе выпускной квалификационной работы были изучены математические основы построения спектра сигнала, описаны алгоритмы функционирования реальных анализаторов спектра. Приведены достоинства и недостатки существующих на отделении ОАР лабораторных программных и аппаратных средств. Основные недостатки связаны с заложенным в основе алгоритме БПФ, а также недостаточным функционалом по настройке начальных данных анализа.

Полученная информация легла в основу алгоритма построения спектра сигнала, базирующегося на расчете интеграла Фурье в комплексной форме для дискретного сигнала. Алгоритм позволяет, при необходимости, выполнять анализ спектра сигнала в реальном времени. На основе алгоритма разработан программный виртуальный прибор «Анализатор спектра». Функционал виртуального прибора дополнен инструментами анализа, позволяющий получать численные значения параметров спектра.

В ходе испытаний разработанного программного «Анализатора спектра» получено подтверждение необходимых технических характеристик, корректное построение спектров как периодических, так и не периодических сигналов.

Виртуальный прибор планируется применять в лабораторных работах студентов НИ ТПУ. Дальнейшее развитие проекта заключается в добавлении функционала расчета фазы сигнала, параллельного анализа двух сигналов, с возможностями математических операций с построенными спектрами. Виртуальный прибор позволит углубить понимание студентами частотной составляющей электрических сигналов, на практике сопоставить рассчитанные математически и реальные спектры, а также сформировать представление о дискретизации аналоговых величин.

Список использованных источников

- 1 Измерения в радиоэлектронике. Учебное пособие / Данилин А.А., Лавренко Н.С. – СПб: Издательство «Лань», 2017. – 408 с.
- 2 Спектры и анализ. Изд. 5–е / Харкевич А.А. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с.
- 3 Поздняков А.Д. Виртуальные радиоизмерительные приборы и комплексы: Учебное пособие / А.Д. Поздняков, В.А. Поздняков. – Владимир : ВлГУ, 2015. – 232 с.
- 4 Цифровые анализаторы спектра / В.Н.Плотников, А.В.Белинский, В.А. Суханов, Ю.Н.Жигулевцев. – М: Радио и связь, 1980 – 185 с.
- 5 Дьяконов В.П. Современные цифровые анализаторы спектра // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С. 185–195
- 6 Основы анализа спектра [Электронный ресурс] / Agilent Technologies – URL: <https://radiorf.ru/wp-content/uploads/2014/11/Osnovy-analiza-spektra.pdf> (дата обращения: 25.05.2020)
- 7 Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / Дьяконов В.П., Афонский А.А. – М.: СОЛОН–Пресс, 2009
- 8 Метрология и радиоизмерения : [учебник] / под ред. Д.С. Викторова. – Красноярск : Изд-во СФУ, 2016. – 509 с.
- 9 Основы спектрального анализа / Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 225 с.
- 10 Поздняков В.А. Развитие методов определения параметров радиосигнала по массиву мгновенных значений : дис. ... к-та тех. наук / В.А. Поздняков. – Владимир, 2004. – 215 с.
- 11 Современные методы Фурье и вейвлет–анализа и синтеза сигналов / Дьяконов В.П. // Контрольно–измерительные приборы и системы. – 2009. - № 2. – С. 42-47

12 Методы анализа спектра сигнала : Учебно-методическое пособие к специальному лабораторному практикуму для студентов старших курсов и магистрантов кафедр радиофизического направления / Христофоров А.В. – Казань : Изд-во КФУ. – 2004. – 21 с.

13 Fundamentals of Real-Time Spectrum Analysis [Электронный ресурс] / Tektronix – URL: https://download.tek.com/document/37W_17249_6_Fundamentals_of_Real-Time_Spectrum_Analysis1.pdf (дата обращения: 25.05.2020)

14 Спектр сигнала : Учебно-методическое пособие / Б.П. Бойко, В.А. Тюрин. – Казань : Изд-во КФУ. – 2014. – 38с.

15 Анализаторы спектра реального времени RSA500 [Электронный ресурс] / Tektronix – URL: <https://ru.tek.com/spectrum-analyzer/rsa500-series> (дата обращения: 25.05.2020)

16 eGuide to RF Signals [Электронный ресурс] / Tektronix – https://download.tek.com/document/Guide%20to%20RF%20Signals_37W_30937_1_eBook.pdf (дата обращения: 25.05.2020)

17 DAQ-устройства М серии : Руководство пользователя устройств типа NI 622х, NI 625х, NI 628х / National Instruments. – 2008. – 412 с.

18 Оценка погрешности метода быстрого спектрального анализа / Н.Я. Мамедов, Н.Т. Абдуллаев, Г.С. Агаева, А.Н. Джафарова // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2015. – т. 58. - № 6. – С. 428-435

19 Аппроксимативный способ спектрального анализа / Е.П. Осадчий, М.П. Берестень, Н.В. Мясникова, Строганов М.П. и др. // Открытия. Изобретения. – 1987. – №35. – С. 138

20 Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / Афонский А. А., Дьяконов В. П. – М.: СОЛОН–Пресс, 2009

21 Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа. М.: Горячая линия – Телеком, 2006

22 Электронные средства связи / Дьяконов В. П., Образцов А. А., Смердов В. Б. – М.: СОЛОН–Пресс, 2005

23 Генерация и генераторы сигналов / Дьяконов В.П – М.: ДМК–Пресс, 2009

24 Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение / Дьяконов В. П. // Компоненты и технологии. - 2009. - № 11 – С. 23-26

25 RIGOL Руководство пользователя Анализатор спектра частот серии DSA800, Октябрь 2012 г. RIGOL Technologies, Inc.

26 Цифровая обработка сигналов в радиоэлектронных системах: Учеб. пособие по курсу «Цифровая обработка сигналов» для студентов специальности 39 01 02 Радиоэлектронные системы дневной формы обучения / С. Б. Саломатин. - Мн.: БГУИР, 2002. – 87 с.

27 Комплект виртуальных измерительных приборов для учебных лабораторий NI ELVIS II. Руководство пользователя

28 Исследование аналоговых схем в программно-аппаратной среде NI ELVIS: учебное пособие / Э.И. Цимбалист, С.В. Силушкин Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 264 с.

29 IEC 60714(1981) Анализаторы спектра. Выражение характеристик

30 IEC/PAS 62129(2004) Калибровка оптических спектральных анализаторов

31 ГОСТ Р 8.762–2011: Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений коэффициента гармоник

32 ГОСТ 8.331–99: Государственная система обеспечения единства измерений. Измерители коэффициента гармоник. Методы и средства поверки и калибровки

33 ГОСТ 30804.4.7 – 2013 (IEC 61000-4 – 7:2009) Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и

интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств

34 ГОСТ 11859-66 Анализаторы гармоник. Методы и средства поверки

35 ГОСТ 17168-82 Фильтры электронные октавные и третьоктавные. Общие технические требования и методы испытаний

36 Трудовой кодекс РФ от 30.12.2001 № 197-ФЗ (принят ГД ФС РФ 21.12.2001) (ред. от 24.04.2020)

37 СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003. – 36 с.

38 ГОСТ Р 50923–96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения

39 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997. – 20 с.

40 ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. – М.: Изд-во стандартов, 2010. – 28 с.

41 Свод правил: СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. М.: Минрегион России, 2011. – 74 с.

42 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы: СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. М.: Минздрав России, 2003. – 39 с.

43 ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2006. – 67 с.

44 ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ. Взрывобезопасность. Общие требования. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 6 с.

45 В.С. Алексеев, И.В. Ткаченко, О.И. Жидкова. Безопасность жизнедеятельности. Сборник лекций. – М.: Эксмо, 2008. – 160 с.

46 Информационное письмо Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека 02/7376-2020-24 от 20.04.2020 г. «О направлении рекомендаций по организации работы предприятий в условиях распространения рисков COVID-19»

47 Проектирование искусственного освещения общественных и жилых зданий : [Методическое пособие Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации] / И.А. Шмаров [и др.] . – М., 2016. – 141 с.

48 СП 367.1325800.2017. Здания жилые и общественные. Правила проектирования естественного и совмещенного освещения.; введ. 2018-06-06. – М. : Стандартинформ, 2018. – 48 с.

Приложение А

(справочное)

Раздел 1

Signal spectrum analysis

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ГМ81	Козлов В.П.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Заревич А.И.	к.т.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Пичугова И.Л.			

1 Signal spectrum analysis

Signals can be analyzed in the time domain using oscilloscopes and in the frequency domain using spectrum analyzers.

Two analysis modes are connected to each other by the Fourier transform, so each signal that varies in time has a characteristic frequency spectrum.

1.1 Fundamentals of spectral analysis

Definition of a periodic function:

$$f(t) = f(t + nT), \quad (1.1)$$

T is a constant value, called a period,

n is any integer.

Formula (1.1) contains the basic property of a periodic function: the process is periodically repeated throughout the entire time from $-\infty$ to $+\infty$. Formula (1.1) expresses a mathematical model that cannot exist in the real world. We can immediately conclude that there are actually no periodic phenomena in the strict sense of the definition (1.1).

If we take the limitations: the function is piecewise continuous, bounded, and has a finite number of extreme values (Dirichlet conditions) over a period, then such a periodic function can be represented with trigonometric functions:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \cos(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k). \quad (1.2)$$

here: c_0 is average amplitude of function for the period;

c_k is sine wave amplitude k ;

φ_k is initial phase of sine oscillation k ;

$k \frac{t}{T}$ is sine wave frequency k .

The periodic function $f(t)$ is represented by the sum of terms of the form:

$$c_k \cos(2\pi k \frac{t}{T} - \varphi_k)$$

The oscillation frequency $k \frac{t}{T}$ is a component of the periodic function $f(t)$, which generate a harmonic sequence. Thus, the frequencies of all components are multiples of the frequency $\frac{t}{T}$. The individual components are called harmonics.

Expression (1.2) can be rewritten in another form:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} - b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T}), \quad (1.3)$$

here:

$$a_k = c_k \cos \varphi_k, \quad b_k = c_k \sin \varphi_k,$$

Thus:

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \text{tg} \varphi_k = \frac{b_k}{a_k}$$

The coefficients a_k and b_k are determined by the formulas:

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos 2\pi k \frac{t}{T} dt, \quad (1.4)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin 2\pi k \frac{t}{T} dt, \quad (1.5)$$

The coefficient c_0 is determined by the formula:

$$c_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt. \quad (1.6)$$

If we take a finite number of values of harmonics N , and approximate the function into a trigonometric polynomial, then we obtain the expansion of the function in a Fourier series:

$$f(t) \cong c_0 + \sum_{k=1}^N (a_k \cos 2\pi k \frac{t}{T} + b_k \sin 2\pi k \frac{t}{T}). \quad (1.7)$$

The Fourier series can also be written in complex form as follows:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{j2\pi k \frac{t}{T}}, \quad (1.8)$$

here:

$$2C_k = c_k e^{-j\varphi_k} = a_k - jb_k; \quad c_k = 2|C_k|; \quad c_0 = C_0$$

The quantity $2C_k$ is the complex amplitude; C_k is found by the formula:

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} dt, \quad (1.9)$$

The Fourier series gives the expansion of a periodic function with respect to trigonometric functions. This decomposition can also be generalized to the case of a nonperiodic function. The Fourier expansion is obtained by passing to the limit as $T \rightarrow \infty$. A nonperiodic function can be considered as the limiting case of a periodic function for an unboundedly increasing period. We take the formula (1.8) and substitute into it the value of C_k from (1.9):

$$f(t) = \frac{1}{T} \sum_{k=-\infty}^{\infty} e^{j2\pi k \frac{t}{T}} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) e^{-j2\pi k \frac{t}{T}} dt \quad (1.10)$$

whence follows:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (1.11)$$

here :

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.12)$$

Expressions (1.11) and (1.12) are the main formulas of the theory of spectra. These expressions are two Fourier transforms that interconnect two functions: the real time function $f(t)$ and the complex frequency function $S(\omega)$. Since the function $f(t)$ is non-periodic, it is the sum of an infinitely large number of infinitesimal, oscillations of infinitely close frequency in decomposition. The frequency interval between the oscillations is equal to the increment of the current angular frequency $d\omega$. The complex amplitude of each individual oscillation is infinitesimal, it is equal to:

$$dC = \frac{1}{\pi} S(\omega) d\omega \quad (1.13)$$

Thus, the Fourier integral defines a non-periodic function as the sum of oscillations with a continuous sequence of frequencies, and the Fourier series decomposes a periodic function by the sum of an infinite number of sinusoids, with discrete values of frequencies. The expansion of a non-periodic function contains all frequencies [2].

The Fourier series connects a periodic function with periodic harmonics of its components. Using the Fourier integral, a non-periodic function is represented as the sum of the periodic components, so the sum does not have the essential properties of its terms.

1.2 Block diagrams of spectrum analyzers

1.2.1 The Swept Spectrum Analyzer

The swept-tuned, superheterodyne spectrum analyzer (SA) is the traditional architecture that first enabled engineers to make frequency domain measurements many decades ago. Originally built with purely analog components, the SA has since evolved along with the applications that it serves. Current generation SAs include digital elements such as ADCs, DSPs, and microprocessors. However, the basic swept approach remains largely the same and is best suited for observing controlled, static signals. A typical block diagram of such an analyzer is shown in Figure A.1.

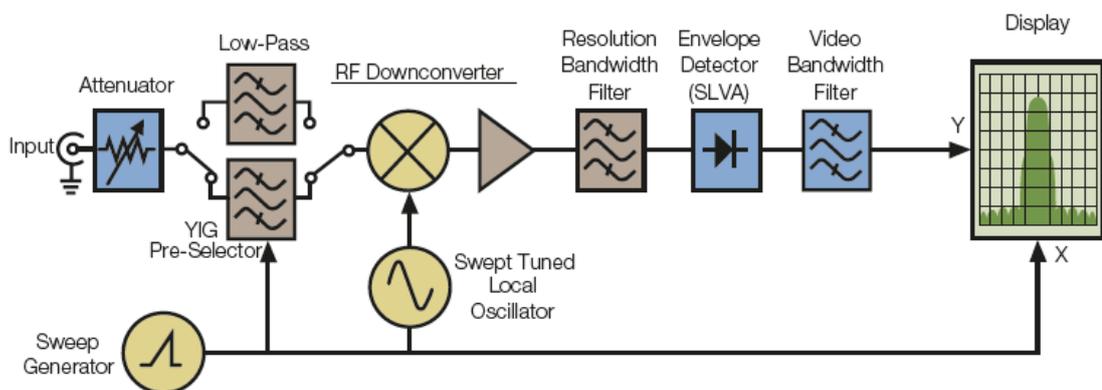


Figure A.1. Block diagram of a swept-tuned spectrum analyzer

The SA makes power vs. frequency measurements by downconverting the signal of interest and sweeping it through the passband of a resolution bandwidth (RBW) filter.

The RBW filter is followed by a detector that calculates the amplitude at each frequency point in the selected span.

The modulating characteristic of the sweeping local heterodyne is usually sought to be linear so that its oscillation frequency changes under the influence of the control voltage from the sweep generator linearly in time. The heterodyne frequency deviation Δf_h is set by adjusting the span so as to cover the entire spectrum of the signal.

In this case, as the local heterodyne frequency changes, the components of the spectrum, as shown in Figure A.2, will move relative to the fixed frequency of the RBW filter, sequentially in time falling into the passband Δf_{RBW} of this filter, the values of which are set by adjusting the passband. Signals with a filling frequency equal to the intermediate frequency f_{RBW} and amplitude proportional to the spectral component of the signal at a frequency $f_{RBW}(t_i) = f_h(t_i) + f_{RBW}$ are fed to the detector input. After detection and amplification, the video impulses are fed to the Y-plates of the display. A scan voltage is applied to the X-plate, which is the modulating voltage during the frequency modulation of the local heterodyne.

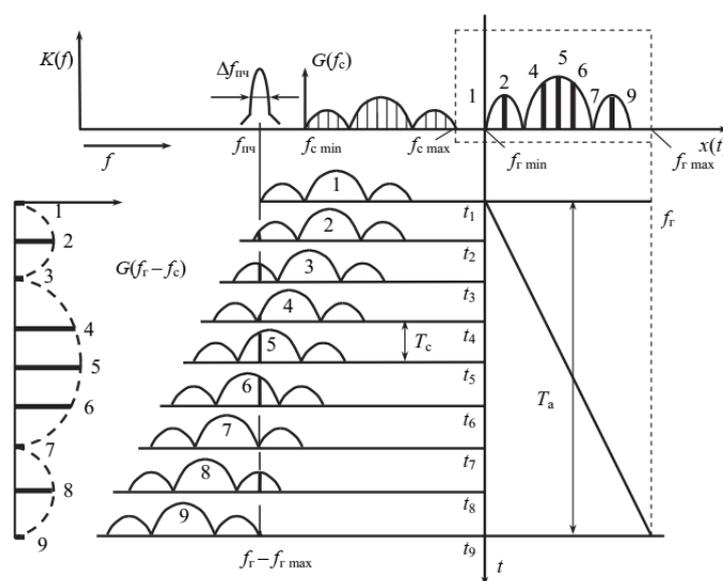


Figure A.2. Timing diagrams of the operation of the SA sequential action

The components of the spectrum will be observed in the form of vertical luminous stripes having a finite width. This width determined by the shape of the frequency response of a narrow-band filter and a height proportional to the average spectral density of a given portion of the signal spectrum.

While this method can provide high dynamic range, its disadvantage is that it can only calculate the amplitude data for one frequency point at a time. This approach is based on the assumption that the analyzer can complete at least one sweep without changing the signal. Consequently, measurements are only valid for relatively stable, unchanging input signals. If there are rapid changes in the signal, it is statistically probable that some changes will be missed. As shown in Figure A.3, the SA is looking at frequency segment F_a while a momentary spectral event occurs at F_b (the diagram on the left). By the time the sweep arrives at segment F_b , the event has vanished and is not detected (the diagram on the right).

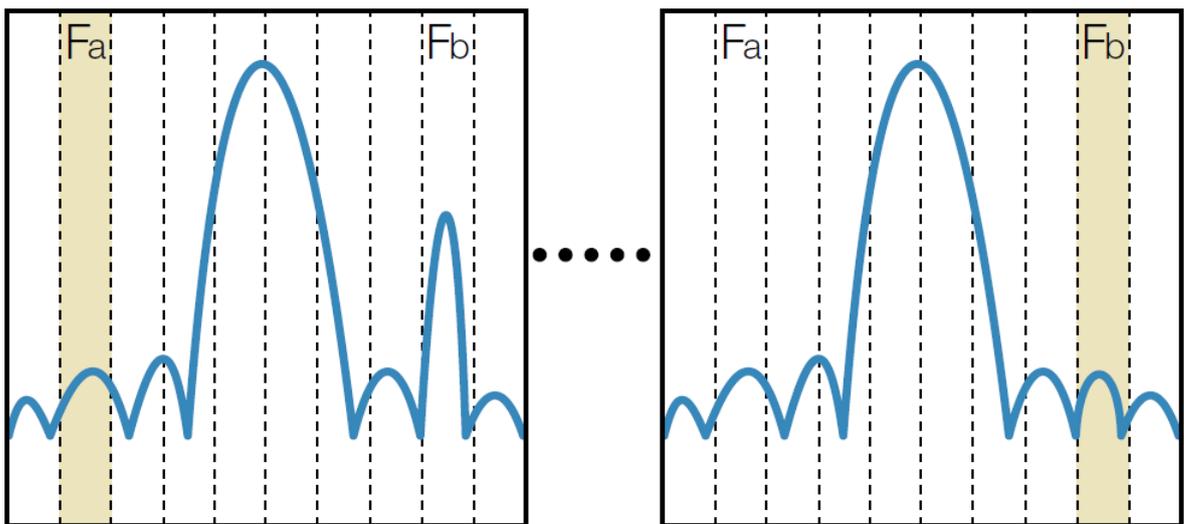


Figure A.3. Skipping an event when plotting a spectrum

The SA architecture does not provide a reliable way to discover the existence of this kind of transient signal, thus contributing to the long time and effort required to troubleshoot many modern radio frequency signals. In addition to missing momentary signals, the spectrum of impulse signals such as those used in modern communications and radar may be misrepresented as well.

SA architectures cannot represent the occupied spectrum of an impulse without repetitive sweeps. One also needs to pay special attention to sweep rate and resolution bandwidth.

1.2.2 Parallel spectrum analyzers

Parallel spectrum analyzers are mainly used to analyze the spectra of single pulse signals. A lot of bandpass filters are used in parallel analysis of the signal spectrum, which is tuned to a specific frequency. The block diagram is shown in Figure A.4 (a).

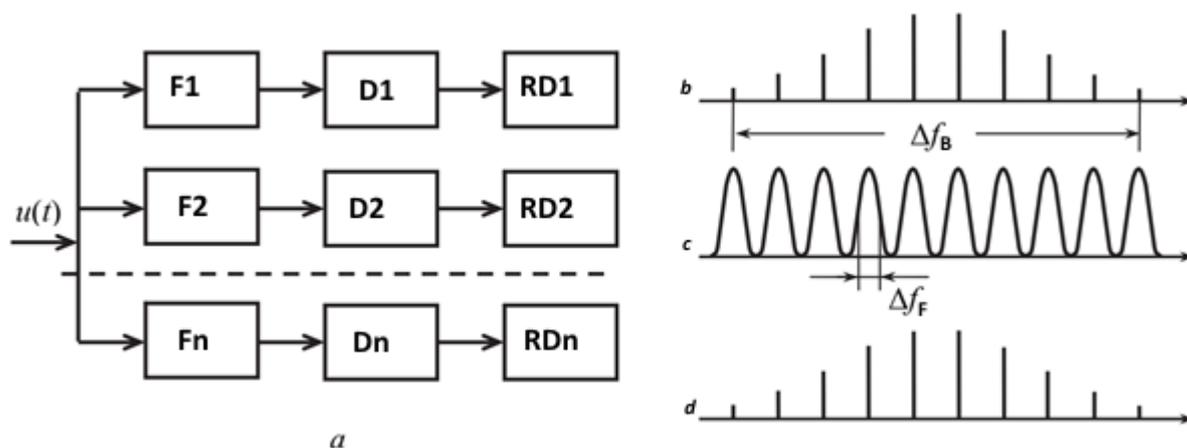


Figure A.4. Structural diagram of a parallel spectrum analyzer (a), signal spectra and AFC filters (b-d)

The signal $u(t)$, whose spectrum is located in the frequency band Δf_B , is applied simultaneously to all filters. Filters have identical frequency response with the same passband Δf_ϕ and are tuned to certain frequencies (Figure A.4 (c)). The signals are determined by the spectrum components of the analyzed process at the output (Figure A.4 (d)). Next, the spectral components are fed to recording devices after detection in the detectors.

The passband of the filter determines the static resolution of the analyzer (the analysis time is $T_a \rightarrow \infty$). The resolution of the analyzer is the ability to distinguish between components of the spectrum with close frequencies. The resolution of the analyzer directly depends on the filter bandwidth. With a wide bandwidth, several components will not be separated. If we evaluate the resolution with a frequency band Δf_p , at which separation of the nearest components is

possible, then with an ideal rectangular frequency response of the filter, we can put $\Delta f_p = \Delta f_F$. For real filters $\Delta f_p = 2\Delta f_F$.

The necessary analysis time for the correct reproduction of the spectrum can be approximately estimated. The analysis time in a parallel research can be taken to be approximately equal to τ_y – the time to establish the voltage at the output of the filter with a rectangular frequency response and a working band Δf_F (0,1 ... 0,9 from the steady-state value). From the theory of filters it is known that the settling time is $\tau_y = 0,86 / (\Delta f_F)$, thus, $T_a \approx \tau_y = 1 / (\Delta f_F)$.

Analysis speed decreases sharply when the filter bandwidth is narrowed. The advantage of parallel-action analyzers is the short analysis time.

The error in parallel analysis is determined by the following main factors: the finiteness of the time it takes to establish the oscillations at the filter output and its dependence on the passband, the difference in the characteristics of filters tuned to different frequencies.

1.2.3 Vector Signal Analyzers

Analyzing signals carrying digital modulation requires vector measurements that provide both magnitude and phase information. A simplified vector signal analyzers (VSA) block diagram is shown in Figure A.5.

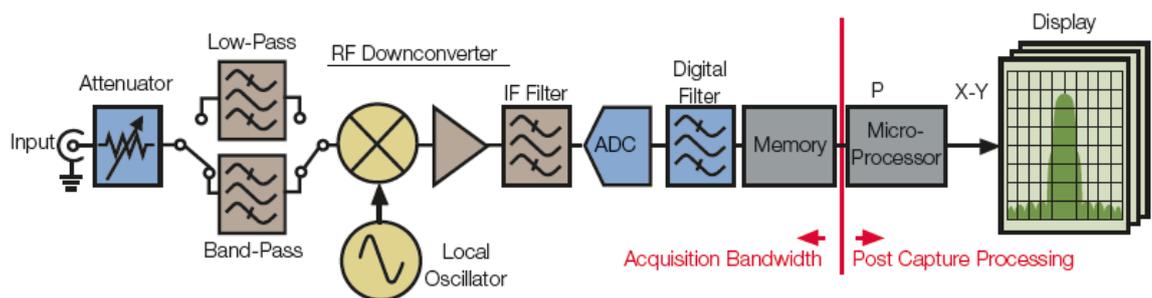


Figure A.5. Block diagram of a vector signal analyzer

A VSA digitizes all of the radio frequency power within the passband of the instrument and puts the digitized waveform into memory. The waveform in memory contains both the magnitude and phase information which can be used by DSP for demodulation, measurements, or display processing. Within the VSA, an

ADC digitizes the wideband IF signal, and the downconversion, filtering, and detection are performed numerically. Transformation from time domain to frequency domain is done using DFT (discrete Fourier transform) algorithms. The VSA measures modulation parameters such as FM deviation, Code Domain Power, and Error Vector Magnitude (EVM and constellation diagrams). It also provides other displays such as channel power, power versus time, and spectrograms.

While the VSA has added the ability to store waveforms in memory, it is limited in its ability to analyze transient events.

In the typical VSA free run mode, signals that are acquired must be stored in memory before being processed. The serial nature of this batch processing means that the instrument is effectively blind to events that occur between acquisitions. Single or infrequent events cannot be discovered reliably. Triggering on these types of rare events can be used to isolate these events in memory. Unfortunately VSAs have limited triggering capabilities. External triggering requires prior knowledge of the event in question which may not be practical. IF level triggering requires a measurable change in the total IF power and cannot isolate weak signals in the presence of larger ones or when the signals change in frequency but not amplitude. Both cases occur frequently in today's dynamic radio frequency environment.

1.2.4 Key features of spectrum analyzers

The frequency range characterizes the boundary values of the frequency interval in which the spectra of the signals are analyzed. In the case of analysis of the spectrum of radio pulses, this characteristic gives an idea of the range of carrier frequencies of the signals whose spectra can be studied by the device. When comparing the characteristics of the device and the studied radio pulse, one should also take into account the width of the spectrum, since the latter sometimes turns out to be significant.

The operating frequency range is mainly determined by the tuning range of the local heterodyne frequency (or the average frequency of the RBW filter). In

practice, the range of operating frequencies of the analyzer can be expanded by using harmonics of the local heterodyne.

The resolution determines the minimum distance along the frequency axis between the two components of the spectrum at which individual lines can be selected and their levels measured. When analyzing continuous spectra, the width of the “cut out” section of the spectrum depends on the resolution.

Strictly speaking, a complete separation of neighboring components is unattainable. It is always somewhat arbitrary. This can be seen in the analysis of a spectrum consisting of two lines (Figure A.6). Oscillations of two frequencies are simultaneously excited in the resonator and beats with a difference frequency occur. The voltage recorded by the indicator has the form of a double-humped curve.

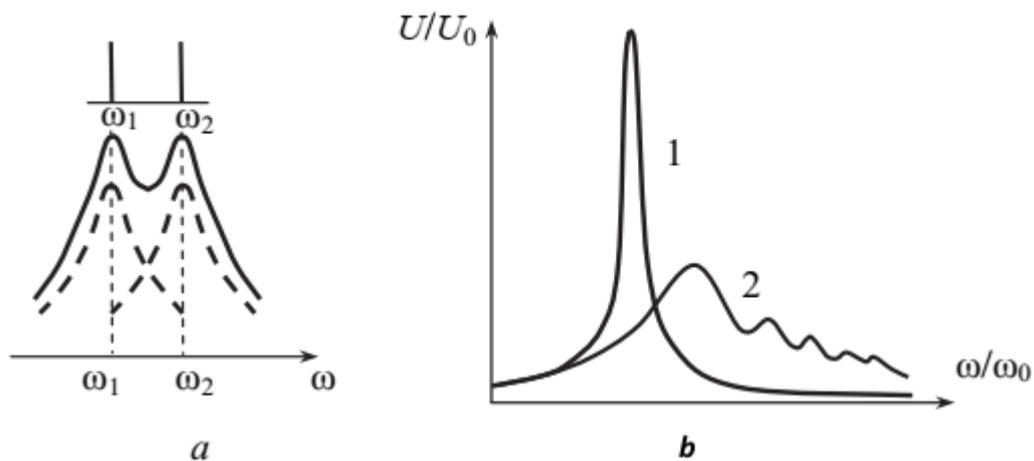


Figure A.6. Graph of the resolution of the spectrum analyzer

Analysis duration is determined by the time it takes to establish the oscillations, which is inversely proportional to the passband Δf of a single RBW filter. In the case of a sequential analysis, its duration is directly proportional to the width of the spectrum and inversely proportional to the square of the passband of the electoral system.

Thus, the duration of the sequential analysis is obtained $n = F / \Delta f$ times longer than the simultaneous one, and it can be determined by the formula:

$$t_{\text{посл}} = \frac{A}{\Delta f} \cdot \frac{F}{\Delta f} = A \frac{F}{\Delta f^2} \quad (1.14)$$

Let us consider analysis speed. In many cases, spectrum studies require a high sequential analysis rate. However, with an increase in the rate of frequency change, the resolution decreases, since the differences between the dynamic characteristic 2 (Figure A.6 (b)) of the analyzer and static one become more significant. The main differences are as follows:

- the transmission coefficient decreases as much as the frequency changes;
- the shift of the maximum of the resonance curve is obtained both in frequency and in time, increasing with increasing rate of change of frequency;
- due to the fact that when approaching the resonance, the expansion of the resonance curve occurs. The amplitude increases smoothly, and decreases with vibrations that accelerate over time; this is due to beats between the free vibrations of the filter and the vibrations exciting it.
- due to the fact that when approaching the resonance, the expansion of the resonance curve occurs. The amplitude increases smoothly, and decreases with vibrations that accelerate over time; this is due to beats between the free vibrations of the filter and the vibrations exciting it;
- the resonance curve becomes more gentle. Selectivity worsens as the rate of change of frequency increases.

Let us consider sensitivity. Spectrum analyzers are instruments with high sensitivity, as they are often used to study weak signals. The sensitivity of low-frequency oscilloscope analyzers is expressed in millivolts. The sensitivity of microwave analyzers is characterized by the same values as the sensitivity of microwave receivers. The passport usually indicates sensitivity to monochromatic signals. The sensitivity of pulsed signals is much less and depends on the duration of the pulse.

Conclusions

The mathematical foundations of constructing the signal spectrum have been described in the first part of the section. The differences between the series and the Fourier integral have been given. Conclusions have been made on the presentation of the properties of the spectrum of periodic and non-periodic signals.

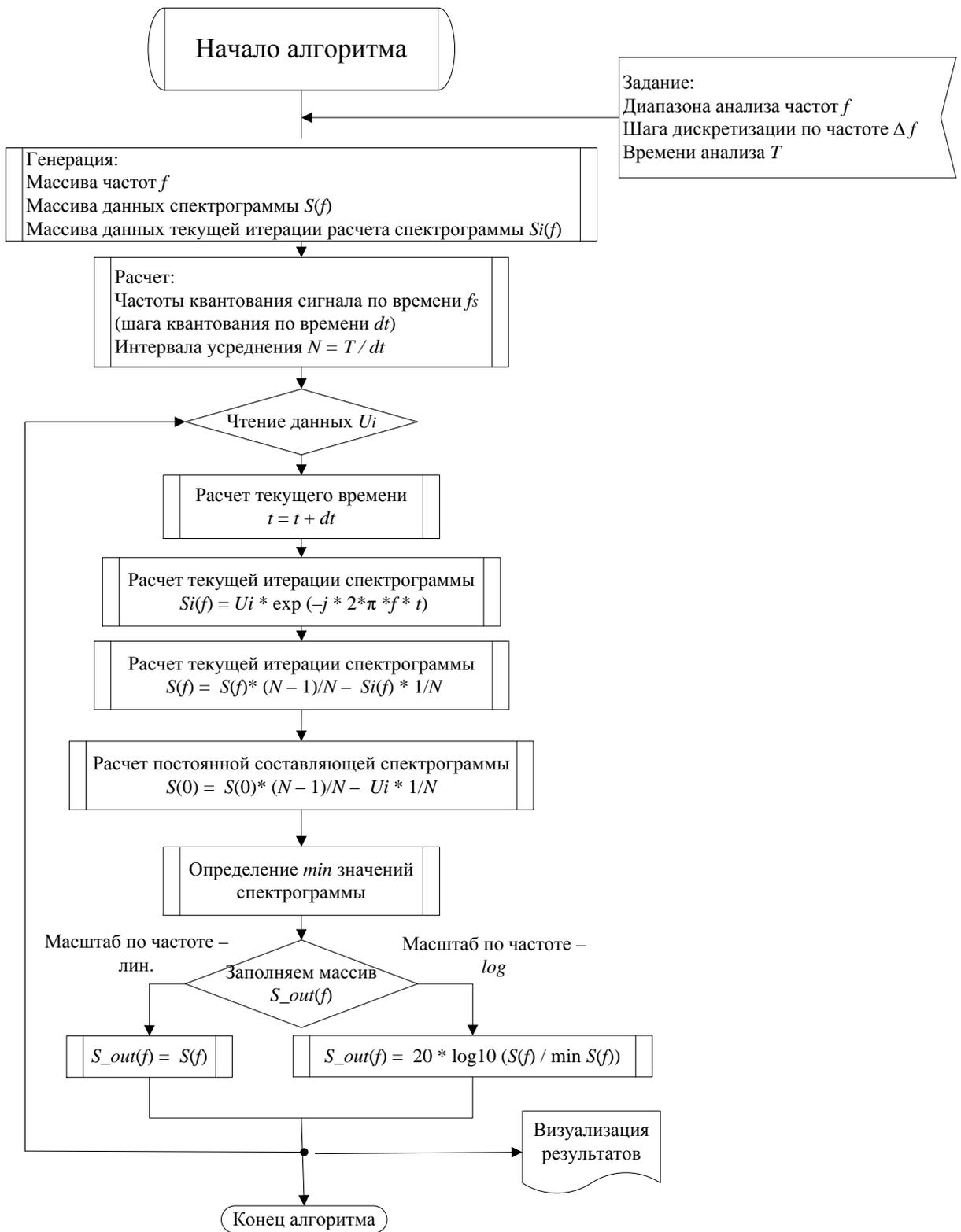
Existing typical spectral analysis schemes have been analyzed in the second part of the section. The architecture of the analyzers is based on general algorithms. In the modern digital era, most devices are made of digital components and use fast Fourier transform algorithms. Despite this, the given block diagrams describe the principles of operation of both analog and digital spectrum analyzers.

The main technical characteristics of the spectrum analyzers have been given in the conclusion. Understanding the value of technical characteristics is necessary for the preparation of technical specifications for the development of a software spectrum analyzer.

Приложение Б

(обязательное)

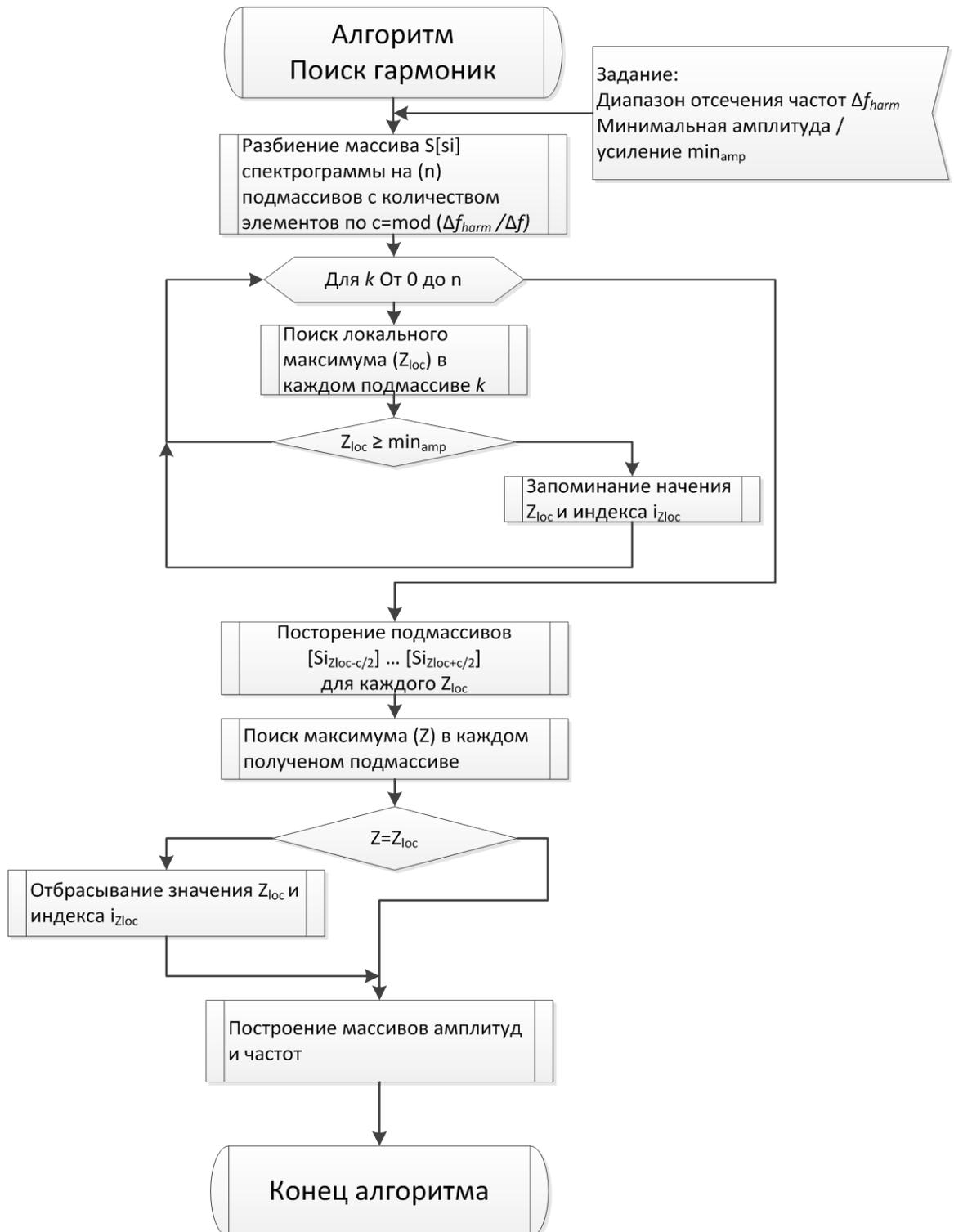
Алгоритм расчета спектра



Приложение В

(обязательное)

Алгоритм определения гармонических составляющих с заданной Точностью



Приложение Г

(обязательное)

Блок схема ВП «Анализатор спектра»

