

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Институт электронного обучения
Специальность 220201 «Управление и информатика в технических системах»
Кафедра Кафедра Автоматики и компьютерных систем

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Тема работы	
Разработка программного обеспечения анализа периодических сигналов сложной формы	

УДК 681.51.075:004

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-8101	Бориско Андрей Викторович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Аврамчук В. С.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Конотопский В. Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ЭБЖ	Невский Е. С.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой АиКС	Фадеев А. С.	к.т.н.		

Томск – 2016 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения

Специальность 220201 - «Управление и информатика в технических системах»

Кафедра автоматизации и компьютерных систем

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Дипломной работы

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-8101	Бориско Андрей Викторович

Тема работы:

Разработка программного обеспечения анализа периодических сигналов сложной формы

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№2917/с от 15 апреля 2016г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

06.06.2016

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(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.).

- источники литературы;
- графический интерфейс программы;
- графический интерфейс построителя 3D поверхности;
- сигналы вибрации ДВС в формате wav.

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>	<i>Аналитический обзор методов спектрального анализа и вычисления частотно-временной корреляционной функции.</i> <i>Разработка алгоритмического и программного обеспечения в MathCad и Delphi 7.0</i>
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Слайд 1 – Тема Слайд 2 – Актуальность работы Слайд 3 – Способы решения проблемы Слайд 4 – частотно-временная корреляционная функция Слайд 5 – Блок-схема алгоритма расчета частотно-временной автокорреляционной функции Слайд 6 – Реализация алгоритма в MathCad Слайд 7 – Модульная структура программы Слайд 8 – Главная форма программы Слайд 9 – Окно настройки Слайд 10 – Изображение графика частотно-временной корреляционной функции Слайд 11 – Исходные данные и результаты расчета тестовых примеров №1 и №2 Слайд 12 – Исходные данные и результаты расчета пример № 3 Слайд 13 – Исследование сигнала вибрации ДВС Слайд 14 – Частотно-временная автокорреляционная функция сигнала вибрации ДВС Слайд 15 – Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение Слайд 16 – Социальная ответственность Слайд 17 – Заключение
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Невский Е.С. ассистент кафедры ЭБЖ
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Конотопский В.Ю. доцент кафедры менеджмента
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.03.2016
---	-------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Аврамчук В.С.	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-8101	Бориско Андрей Викторович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-8101	Бориско Андрей Викторович

Институт	Институт электронного обучения	Кафедра	Кафедра Автоматики и компьютерных систем
Уровень образования		Направление/специальность	Управление и информатика в технических системах

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	...
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	...
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	...

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	...
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	...
3. Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР	...
4. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	...
5. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности ИР и потенциальных рисков	...

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. «Портрет» потребителя
2. Оценка конкурентоспособности ИР
3. Матрица SWOT
4. Модель Кано
5. ФСА диаграмма
6. Оценка перспективности нового продукта
7. График разработки и внедрения ИР
8. Инвестиционный план. Бюджет ИП
9. Основные показатели эффективности ИП
10. Риски ИП

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Конотопский В. Ю.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-8101	Бориско Андрей Викторович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-8101	Бориско Андрей Викторович

Институт	Институт электронного обучения	Кафедра	Кафедра Автоматики и компьютерных систем
Уровень образования		Направление/специальность	Управление и информатика в технических системах

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Производственная безопасность:</i>	При работе с программой для анализа периодических сигналов сложной формы большой объем времени человек проводит за компьютером. Мониторы и системные блоки производят электромагнитное излучение. Напряженность электромагнитного потока не должна превышать норм установленных СанПиН 2.2.2.542-96 При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является монитор. Под влиянием ионизирующего излучения в организме могут происходить различные нарушения здоровья. Нормы излучения установлены СанПиН 2.2.2.542-96. Работа за компьютером сопровождается постоянным напряжением функций зрительного анализатора. Расстройство органов зрения резко увеличивается при работе более четырех часов в день. Для предупреждения ухудшения зрения рекомендуется организация перерывов на 10–15 минут через каждые 45–60 минут работы. При диагностике работающий двигатель автомобиля служит источником повышенного шума и вибрации. Уровень шума на рабочих местах должен не превышать значений, которые установлены СН 2.2.4/2.1.8.562–96.
2. <i>Экологическая безопасность:</i>	Диагностика двигателя и обнаружение неисправностей на ранних этапах позволяет снизить материальные и энергетические затраты на ремонт оборудования. При поддержании технических характеристик ДВС, заявленных производителем, за счет своевременной диагностики и ремонта сокращается выброс в атмосферу вредных веществ, которые содержатся в выхлопных газах
3. <i>Защита в чрезвычайных ситуациях:</i>	При неверной работе программы для анализа вибросигналов не исправный двигатель может ошибочно быть признан рабочим. Вследствие этого возникает угроза транспортной аварии и пожара в результате ДТП. Транспортная авария – опасное техногенное происшествие, возникшее в процессе движения по дороге транспортного средства и с его участием, при котором погибли или ранены люди, повреждены транспортные средства или был нанесен ущерб окружающей среде.

	В результате дорожно-транспортного происшествия на автомобиле может возникнуть пожар. Повреждение систем и узлов автомобиля при ДТП способствует развитию пожара; а заклинивание дверей и травмирование людей препятствует возможности тушения пожара ручными средствами и быстрой эвакуации пострадавших. Для предупреждения возникновения ЧС требуется отладка программы и лабораторные испытания .
4.Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<i>Рабочее место</i> – часть производственной площади мастерской или цеха с инструментом, оборудованием, материалами и приспособлениями, необходимыми для выполнения производственного задания. Организация рабочего места является важнейшим звеном организации труда. Правильно организованным считается такое рабочее место, на котором при наименьшей затрате сил и средств благодаря рациональной и культурной организации труда достигаются наивысшая производительность и высокое качество продукции.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	14.05.2016
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент кафедры ЭБЖ	Невский Е. С.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-8101	Бориско Андрей Викторович		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения

Направление 220201 - «Управление и информатика в технических системах»

Уровень образования специалист

Кафедра автоматизации и компьютерных систем

Период выполнения (осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года)

Форма представления работы:

Дипломная работа

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

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	06.06.2016
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.05.2014 г.	Основная часть	60
23.05.2014 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
27.05.2014 г.	Социальная ответственность	10
30.05.2014 г.	Обязательное приложение на английском языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АИКС	Аврамчук В.С.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой АИКС	Фадеев А.С.	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 96 страниц, 18 рисунков, 9 таблиц, 15 источников литературы.

Ключевые слова: цифровой сигнал, автокорреляция, частотно-временной корреляционный анализ, двигатель внутреннего сгорания, вибродиагностика.

Объектом исследования является метод частотно-временного корреляционного анализа сигналов.

Цель работы – разработка программного обеспечения для выявления периодических составляющих в полигармонических сигналах.

В процессе исследования проводились тестовые эксперименты по определению наличия периодической составляющей в зашумленном сигнале, а так же эксперименты с двигателем автомобиля ВАЗ 21013.

В результате исследования было показано, что с помощью частотно-временного корреляционного анализа возможно определить наличие периодически возникающих сигналов в смеси полезного сигнала и интенсивного шума.

Степень внедрения: практические результаты, полученные при выполнении работы, использованы при разработке универсального программного обеспечения анализа полигармонических сигналов.

Область применения: созданные алгоритмы могут быть использованы при разработке программного обеспечения при решении задач цифровой обработки сигналов и вибродиагностики ДВС.

Экономическая эффективность/значимость работы: данная работа является промежуточным этапом создания универсального программного обеспечения анализа полигармонических сигналов.

Оглавление

Реферат	9
Оглавление	10
Введение.....	12
1. Цифровая обработка сигналов	13
1.1 Задачи цифровой обработки сигналов	13
1.2 Виды сигналов	15
1.3 Энергия и мощность сигнала	16
1.4 Ряд Фурье	17
1.5 Дискретизация сигналов.....	21
1.6 Спектр дискретного сигнала	24
1.7 Дискретное преобразование Фурье	27
1.8 Корреляционный анализ.....	30
2. Диагностика двигателя внутреннего сгорания	34
2.1 Диагностика неисправностей по внешним признакам.....	38
2.1.1 Диагностика по цвету выхлопных газов.....	38
2.1.2 Диагностика по шумам и стукам	39
2.1.3 Диагностика неработающего двигателя	40
2.2 Инструментальная диагностика	40
2.2.1 Диагностирование неисправностей двигателя измерением давления в цилиндре в конце такта сжатия	41
2.2.2 Диагностирование неисправностей двигателя измерением разряжения в цилиндрах и впускном коллекторе.....	43
2.2.3 Диагностирование неисправностей двигателя измерением падения давления воздуха, подаваемого в цилиндры	43
2.2.4 Диагностирование неисправностей двигателя измерением давления масла в системе смазки.....	43
2.2.5 Диагностирование неисправностей двигателя с помощью компьютерных диагностических комплексов (мотор-тестеров) и персональных электронных диагностических приборов.....	44
2.3 Виброакустическая диагностика	44
3. Разработка алгоритма частотно-временного автокорреляционного анализа .	49
3.1 Программная реализация частотно-временной корреляционной функции	53
3.2 Тестовые примеры определения гармонических составляющих.....	60
3.3 Тестовые примеры вибродиагностики ДВС.....	64
4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	68
4.1 Организация и планирование работ	68
4.1.1 Продолжительность этапов работ	70
4.1.2 Расчет накопления готовности проекта	76
4.2. Расчет сметы затрат на выполнение проекта	77
	10

4.2.1 Расчет затрат на материалы	78
4.2.2 Расчет заработной платы.....	78
4.2.3 Расчет затрат на социальный налог.....	79
4.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	79
4.2.5 Расчет амортизационных расходов	80
4.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных).....	81
4.2.7 Расчет прочих расходов.....	81
4.2.8 Расчет общей себестоимости разработки	82
4.2.9 Расчет прибыли	82
4.2.10 Расчет НДС	83
4.2.11 Цена разработки ВКР.....	83
4.3. Оценка экономической эффективности проекта	83
5. Социальная ответственность	84
5.1. Производственная безопасность.....	84
5.1.1 Повышенный уровень электромагнитных излучений	85
5.1.2 Повышенная ионизация воздуха	85
5.1.3 Напряжение глаз.....	86
5.1.4 Требования к шуму и вибрациям в помещениях	87
5.2 Экологическая безопасность.....	87
5.2.1 Анализ воздействия объекта на атмосферу.....	88
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	89
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	90
5.4.1 Организация рабочего места автомеханика	90
Заключение	92
Conclusion.....	94

Введение

В настоящее время цифровая обработка сигналов используется в различных областях науки и техники: сейсмология, радиолокация, анализ звуковых сигналов, медицина, химия, биология и т. д. Наиболее часто решаемые задачи ЦОС это: цифровая фильтрация, спектральный анализ и выделение гармонической составляющей из сигнала с интенсивными помехами. Для выделения полезного сигнала применяется корреляционный анализ сигналов. По виду автокорреляционной функции определяют присутствие слабой периодической составляющей в смеси сигнала и её период. Сложности возникают при анализе полигармонических сигналов, в связи с тем, что анализ автокорреляционной функции таких сигналов весьма затруднителен и зависит от параметров гармонических составляющих сигнала. В таком случае для вычисления частоты гармонических составляющих используют фильтрацию сигнала и спектральный анализ. Применение этого способа затруднено по следующим причинам: во-первых, чаще всего спектр полезного сигнала неизвестен, а мощность шума может быть на много больше, чем мощность полезного сигнала, во-вторых, спектр помех может перекрывать спектр полезного сигнала. Целью данной работы является разработка программного обеспечения анализа периодических сигналов сложной формы. Данное программное обеспечение предназначено для определения присутствия гармонических составляющих и их частот в полигармонических сигналах, в частности для диагностики сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания с целью определения текущего технического состояния агрегата и принятия решений о необходимости проведения профилактических и ремонтных работ.

1. Цифровая обработка сигналов

Цифровая обработка сигналов (ЦОС) – в вычислительной технике арифметическая обработка последовательности равномерных по времени отсчетов. Также цифровая обработка - это обработка одномерных и многомерных массивов данных.

Цифровая обработка сигналов применяется в различных областях: в области мультимедийных технологий, то есть обработки речи, звука и изображений, обработка биомедицинских данных, радаров и сенсоров, обработка сигналов с сонаров, спектральный анализ, выделение полезного сигнала при интенсивных помехах.

1.1 Задачи цифровой обработки сигналов

На практике на входе системы ЦОС можно наблюдать смесь $x(t)$, которая состоит из полезного сигнала $s(t)$, различных помех разной природы $p(t)$ и некоторого шума $n(t)$:

$$x(t)=s(t)+p(t)+n(t)$$

где $n(t)$ - характеристика технического устройства, а $p(t)$ – это какое-то искажающее воздействие окружающей среды, в которой распространяется сигнал.

Различают следующие задачи ЦОС [4]:

- 1) Качественный прием сигнала – максимально возможное подавление шумов и помех различной природы.
- 2) Определение числовых параметров сигналов – средней мощности, энергии, среднеквадратичного значения и т.д.
- 3) Разложение сигналов на элементарные составляющие для того, чтобы в дальнейшем рассматривать их совместно или по отдельности друг от друга, и так же решение задачи обратного синтеза сигнала.

4) Корреляционный анализ, т.е. количественное измерение степени подобия или сходства сигналов.

5) Решение задач распознавания и идентификации сигналов.

Цифровая обработка сигналов осуществляется в несколько этапов [9]:

1) Предварительная (первичная) обработка – оптимальный приём и анализ сигнала, преобразование из непрерывной (аналоговой) формы в цифровую.

Одной из важных задач первичной обработки сигнала является подавление шума и помехи. Эту задачу можно решить только на основе использования избыточности представления исходного сигнала, а также имеющихся сведений о свойствах полезного сигнала, шума и помехи для роста вероятности корректного приема [3].

На вход приемного устройства системы ЦОС поступает смесь полезного сигнала и помехи, вследствие этого, вероятность оптимального приема определяются отношением полезного сигнала к помехе. Для роста вероятности корректного приема сигнала нужно производить предварительную обработку принятого сигнала, которая обеспечит увеличение отношения сигнал/помеха. Устройства предварительной обработки при приеме сигнала должны иметь два главных элемента (рис. 1.1): фильтр Φ , обеспечивающий снижение помехи, и решающее устройство РУ, которое выполняет основные функции приема (обнаружение и восстановление сигналов).

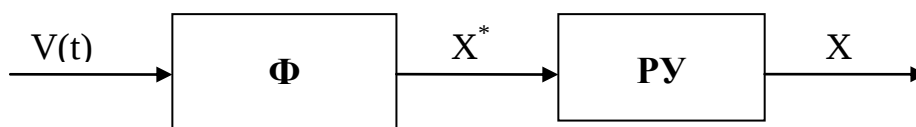


Рисунок 1.1 – Структура типового приемного устройства

Существуют различные методы фильтрации, которые обеспечивают улучшение соотношения сигнал/помеха:

- частотная фильтрация;

- метод накопления;
- согласованная фильтрация;
- корреляционный метод;
- нелинейная фильтрация.

Эти методы основываются на использовании отличий свойств полезного сигнала и помехи.

2) Вторичная обработка – определение сигнала заданного вида, идентификация, классификация, распознавание и т.д.

1.2 Виды сигналов

В цифровой обработке сигнал это – зависимость одной величины от другой, т.е. некоторая вещественная функция, которая содержит информацию о поведении или состоянии физической системы при некотором событии, которую можно определить на дискретном или непрерывном пространстве изменения времени или пространственных координат. Можно привести следующие примеры сигналов: Звуковой сигнал - это зависимость напряжения в проводнике от времени, так же звуковой сигнал можно представить как зависимость давления воздуха в точке от времени. Зависимость яркости точки на плоскости от ее координат можно рассматривать как черно-белое изображение.

Сигналы подразделяются на следующие виды [3]:

1) Аналоговые сигналы $x=x(t)$, описываются непрерывными функциями непрерывного аргумента, например, времени. При этом значение сигнала может принимать любые значения на некотором интервале и может быть в любой момент времени определено как действительное число.

2) Дискретные сигналы отличаются от аналоговых тем, что их значения известны лишь в дискретные моменты времени. Дискретные сигналы описываются последовательностями – $x_d(nT)$, где $T=const$ – период дискретизации, $n=0,1,2,\dots$. Сама функция $x_d(nT)$ может принимать в

дискретные моменты времени произвольные значения на некотором интервале. Такие значения функции принято называть отсчетами функции или выборками.

3) Цифровые сигналы $X=[x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}]$, представляют собой дискретные сигналы, которые в дискретные моменты времени могут принимать лишь конечный ряд дискретных значений – уровней квантования. Процесс преобразования дискретного сигнала в цифровой обработке называется квантованием по уровню.

4) Детерминированные сигналы - в любой момент времени значение сигнала точно определено.

5) Случайные сигналы - сигналы, значения которых в произвольные моменты времени невозможно вычислить, значения можно только предсказать с некоторой вероятностью.

6) Периодические сигналы:

$$S(t) = S(t + nT); n = 1, 2, \dots$$

Где T – это период сигнала; $f = \frac{1}{T}$ – частота повторения сигнала (с^{-1} , Гц);
 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота (рад/с). Периодические сигналы имеют бесконечную энергию

7) Финитные сигналы – сигналы конечной длины. Эти сигналы не равны нулю на ограниченном временном интервале. Финитные сигналы имеют конечную энергию.

1.3 Энергия и мощность сигнала

При анализе сигналов используются такие параметры как мощность и энергия сигнала. В теории обработки сигналов определения этих параметров отличаются от «физических» понятий энергии и мощности.

Энергия сигнала:

$$E = \int_0^T s^2(t) dt \quad (1.1)$$

Энергия сигнала может быть бесконечной или конечной. Так периодические сигналы имеют бесконечную энергию, а сигналы конечной длительности имеют конечную энергию.

Мгновенная мощность сигнала:

$$p(t) = s^2(t) \quad (1.2)$$

Так же существует понятие средней мощности. Для того чтобы вычислить среднюю мощность за заданный интервал времени нужно разделить энергию на длительность промежутка времени.

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt \quad (1.3)$$

1.4 Ряд Фурье

Периодические сигналы можно представить в виде суммы гармоник или гармонических составляющих, каждая из них имеет определённую начальную фазу, амплитуду и частоту. Конкретный набор этих составляющих определяется видом сигнала $S(t)$. Для того, чтобы можно было осуществить разложение на гармоники, нужно чтобы фрагмент сигнала продолжительностью в один период T удовлетворял условиям Дирихле [3]:

- 1) не должно быть разрывов II рода;
- 2) число разрывов I-го рода (или скачков) должно быть конечным;
- 3) число экстремумов должно быть конечным.

Если эти требования соблюдаются, тогда периодический сигнал $S(t)$ можно представить в виде ряда Фурье:

$$S(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t), \quad (1.4)$$

Где $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ – круговая частота или период повторения сигнала;

$\frac{A_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) dt$ – постоянная составляющая сигнала;

$k\omega_1$ – k-я гармоника или k-я частотная составляющая сигнала.

Коэффициенты a_k и b_k рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} a_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos(k\omega_1 t) dt, \\ b_k &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \sin(k\omega_1 t) dt \end{aligned} \quad (1.5)$$

Пределы интегрирования можно брать другие, например, от 0 до T – важно, чтобы был охвачен полностью только один период сигнала $S(t)$.

Если $S(t)$ – четная функция, то все b_k равны нулю, в таком случае в формуле ряда Фурье присутствуют только косинусные слагаемые. И наоборот если $S(t)$ – не четная функция, то коэффициенты a_k будут равны нулю и в формуле будут только синусные слагаемые.

Неудобство такой записи формулы ряда Фурье заключается в том, что для каждого значения индекса суммирования k в формуле есть два слагаемых – синус и косинус. Для удобства формулу разложения в ряд Фурье можно записать в тригонометрической форме:

$$S(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\omega_1 t + \varphi_k), \quad (1.6)$$

Где $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ – амплитуда k-й гармоники;

$\varphi_k = \arctg(b_k/a_k)$ – начальная фаза.

Если $S(t)$ – четная функция, то фазы φ_k принимают значения только 0 и π , если $S(t)$ – нечетная, тогда значения фазы φ_k равны $\pm\pi/2$.

Наиболее употребляемой в радиотехнике является комплексная форма записи ряда Фурье. Такая форма получается из вещественной формы путем представления косинуса как полусумму комплексных экспонент:

$$\cos x = \frac{1}{2}(e^{jx} + e^{-jx}). \quad (1.7)$$

При применении данного преобразования к тригонометрической форме ряда Фурье, получают суммы комплексных экспонент с отрицательными и положительными показателями:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_k}{2} (e^{jk\omega_1 t + j\varphi_k} + e^{-jk\omega_1 t - j\varphi_k}) \quad (1.8)$$

Экспоненты, у которых в показателе стоит знак «минус» принимают как члены ряда с отрицательными номерами, а постоянное слагаемое $\frac{a_0}{2}$ принимают как член ряда с нулевым номером. В итоге получится комплексная форма записи ряда Фурье:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{C}_k e^{-jk\omega_1 t} \quad (1.9)$$

Комплексные коэффициенты ряда связаны с фазами φ_k и амплитудами A_k фигурирующими в тригонометрической форме записи ряда Фурье следующими соотношениями:

$$\dot{C}_k = \frac{1}{2} A_k e^{j\varphi_k},$$

$$A_k = 2 |\dot{C}_k| \quad \varphi_k = \arg(\dot{C}_k).$$

Коэффициенты a_k и b_k синусно-косинусной формы записи ряда Фурье так же связаны с комплексными коэффициентами не сложными формулами:

$$\dot{C}_k = \frac{a_k}{2} - j \frac{b_k}{2},$$

$$a_k = 2 \operatorname{Re}(\dot{C}_k) \quad \varphi_k = -2 \operatorname{Im}(\dot{C}_k).$$

Отсюда следует формула расчета коэффициентов $\dot{C}_k$ ряда Фурье в комплексной форме:

$$\dot{C}_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s(t) e^{-jk\omega_1 t} dt \quad (1.10)$$

Если $s(t)$ – четная функция, то коэффициенты ряда $\dot{C}_k$ – чисто вещественные, а если $s(t)$ – нечетная функция, то $\dot{C}_k$ являются чисто мнимыми.

Амплитудным спектром называют множество амплитуд гармоник ряда Фурье, а фазовым спектром – множество фаз.

Если $S(t)$ – действительная функция, то фазовый и амплитудный спектры обладают симметрией:

$$A_{-k} = A_k$$

$$\varphi_{-k} = \varphi_k.$$

$$\dot{C}_{-k} = \dot{C}_k$$

Реальный сигнал является непериодическим, так как ограничен во времени. Условно такой сигнал можно рассматривать как периодический с периодом $T \rightarrow \infty$. Тогда $\omega_0 = 2\pi/T \rightarrow 0$, а спектры фаз и амплитуд становятся постоянными, сумма в ряду Фурье превращается в интеграл.

Непериодический сигнал можно описать в частотной области с помощью прямого интегрального преобразования Фурье, но для этого нужно, чтобы он удовлетворял следующим требованиям[3]:

- 1) должно выполняться условие Дирихле;
- 2) сигнал должен быть абсолютно интегрируемым, т.е.:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |S(t)| dt < \infty$$

Прямое преобразование Фурье имеет вид:

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) e^{-j2\pi f t} dt = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \cos(2\pi f t) dt - j \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \sin(2\pi f t) dt \end{aligned} \quad (1.11)$$

где $S(\omega)$ – спектральная плотность или спектральная функция сигнала. Так же ее называют Фурье-спектром или Фурье-образом сигнала.

Для преобразования в этом выражении применена формула Эйлера для представления комплексного числа в тригонометрической форме:

$$e^{jx} = \cos x + j \sin x \quad (1.12)$$

От спектральной функции можно перейти к амплитудному спектру

$$A(\omega) = \sqrt{Re^2[\dot{S}(\omega)] + Im^2[\dot{S}(\omega)]} \quad (1.13)$$

и фазовому спектру

$$\varphi_\omega = \arctg \left[\frac{Im(S(\dot{\omega}))}{Re(S(\dot{\omega}))} \right] \quad (1.14)$$

Для вещественной функции $S(t)$ спектральная плотность на частотах ω и $-\omega$ комплексно-сопряжённая, т.е. $\dot{S}(-\omega) = \dot{S}^*(\omega)$, в этом случае для фазового и амплитудного спектров будут справедливы соотношения:

$$A(\omega) = A(-\omega)$$

$$\varphi(\omega) = \varphi(-\omega)$$

Если $S(t)$ – чётная, тогда спектральная плотность будет чётной и вещественной, а если $S(t)$ – нечётная, тогда $S(\omega)$ – нечётная и мнимая.

Обратное преобразование Фурье служит для перехода из частотной области во временную область заданного сигнала:

$$S(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1.15)$$

1.5 Дискретизация сигналов

Смысл цифровой обработки сигналов заключается в том, чтобы физический (аналоговый) сигнал (ток, напряжение и т.д.) преобразовать в набор чисел, который используется для работы в вычислительном устройстве. Полученный цифровой сигнал, если нужно можно преобразовать обратно в ток или напряжение.

Большинство сигналов в реальности являются непрерывными функциями. Для того чтобы обрабатывать сигналы на вычислительной технике нужно перевести аналоговые сигналы в цифровую форму. Для этого применяют дискретизацию сигналов – это процесс преобразования непрерывной области

изменения аргумента к конечному множеству отдельных значений аргумента, а затем квантование - процесс преобразования от непрерывной области изменения функции к конечному множеству определенных значений.

Дискретизацию постоянного сигнала можно осуществить тремя способами [3]:

1) Выбор отсчетов сигнала производится в фиксированные моменты времени, которые следуют через равные отрезки времени Δt (Δt - шаг дискретизации, а его обратная величина $f_D = 1/\Delta t$ называется частотой дискретизации), этот способ называется равномерной по времени дискретизацией;

2) Выбор отсчетов сигнала производится в моменты времени, которые следуют, друг за другом через не равные отрезки времени (обычно выбор величины интервала времени зависит от скорости изменения сигнала на различных промежутках времени), такой способ носит название адаптивная дискретизация;

3) Выбор отсчетов производится в фиксированные моменты времени, которые задаются случайным образом по какому-либо закону, так называемая стохастическая дискретизация.

На практике чаще всего применяется дискретизация с равномерным по времени шагом, потому что это самый простой способ дискретизации.

Переход от аналогового сигнала к цифровому приводит к утрате информации о значениях сигнала в моментах между измерениями. Восстановление исходного непрерывного (аналогового) сигнала по его дискретным значениям и уменьшение потери информации может зависеть от различных параметров дискретизации таких как: шаг дискретизации, способ восстановления сигнала и свойств сигнала.

Гармонический сигнал можно однозначно представить дискретными значениями (отсчётами), при условии, что частота такого сигнала меньше половины частоты дискретизации. Эта частота носит название частоты

Найквиста $f_N = \frac{f_D}{2}$. В зависимости от соотношения между частотой сигнала, который подвергается дискретизации, и частоты Найквиста возможны три ситуации:

1. $f_s < f_N$ - по дискретным отсчетам, можно правильно восстановить исходный аналоговый сигнал.
2. $f_s = f_N$ - по дискретным отсчетам можно восстановить сигнал с такой же частотой, которая была до дискретизации, но фаза и амплитуда восстановленного аналогового сигнала могут быть искажены.
3. $f_s > f_N$ - восстановленный аналоговый сигнал будет гармоническим, но его частота будет отличаться от частоты исходного сигнала. Проявляется так называемый эффект появления ложных частот.

Восстановление аналогового сигнала из дискретного без потерь возможно, если выполняется условие, которое определяется из теоремы Котельникова.

Если сигнал $S(t)$ имеет финитную спектральную плотность, локализованную в полосе частот $\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$, то он может быть без потерь представлен дискретными отсчетами $S(k\Delta t)$, удовлетворяющих условию [4]:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{\max}} = \frac{\pi}{\omega_{\max}}$$

Обобщенная структурная схема системы цифровой обработки сигналов показана на рисунке 1.2.

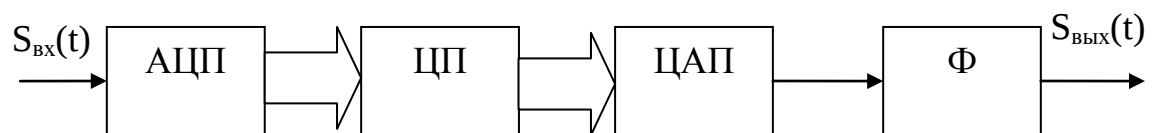


Рисунок 1.2 – Структурная схема системы цифровой обработки сигналов

На вход поступает аналоговый сигнал $S_{\text{вх}}(t)$. Его дискретизация по времени и квантование по уровню происходит в аналого-цифровом

преобразователе (АЦП, analog-to-digital converter, ADC). Квантование и дискретизация независимы друг от друга, но, как правило, они выполняются последовательно внутри одной микросхемы. На выходе АЦП появляется последовательность чисел, которая поступает в цифровой процессор ЦП, выполняющий требуемую обработку сигнала. Процессор выполняет различные математические операции над входящим сигналом. В результате вычислений процессора на выходе ЦП появляется новая последовательность чисел, которая представляет собой отсчеты выходного сигнала. Аналоговый выходной сигнал $S_{\text{вых}}(t)$ восстанавливается из этой последовательности чисел при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП, digital-to-analog converter, DAC). На выходе ЦАП сигнал имеет ступенчатую форму. Ступенчатый сигнал преобразуется в плавный выходной сигнал при помощи сглаживающего фильтра Φ .

1.6 Спектр дискретного сигнала

С помощью преобразования Фурье можно рассчитать спектральную плотность сигнала, которая представляет собой функцию. Дискретный сигнал представляет собой последовательность чисел, поэтому для того чтобы провести анализ его спектра обычными средствами необходимо сопоставить данной последовательности какую-то функцию.

Обычно для такого сопоставления представляют отсчеты в виде дельта-функций с соответствующими задержками и множителями. Для последовательности отсчетов $\{x(k)\}$ получится следующий сигнал[4]:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)\delta(t - k) \quad (1.16)$$

Преобразование Фурье является линейным, спектр дельта-функции равен единице, в связи с задержкой сигнала во времени спектр умножается на

комплексную экспоненту. Это дает возможность записать спектр дискретного сигнала:

$$\dot{S}(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k)e^{-i\omega k} \quad (1.17)$$

По этой формуле видно основное свойство спектра любого дискретного сигнала: спектр сигнала периодический, и в этом случае его период равен 2π :

$$\dot{S}(\omega \pm 2\pi) = \dot{S}(\omega)$$

Размерность функции спектра дискретного сигнала одинакова с размерностью отсчетов. Связано это с тем, что дельта-функции времени, составляющие сигнал, имеют размерность частоты.

По формуле (1.17) можно вычислить спектральную функцию по известным отсчетам $x(k)$. Если число ненулевых отсчетов конечно, этот расчет несложен.

Выясним, какая есть связь между спектром дискретного сигнала и спектром аналогового сигнала $\dot{S}(\omega)$ в случае когда значения $x(k)$ представляют собой отсчеты аналогового сигнала $s(t)$, взятыми с периодом T :

$$x(k) = s(kT)$$

Рассматривают дискретный сигнал в виде последовательного набора дельта-функций, «взвешенного» значениями отсчетов $s(kT)$ аналогового сигнала $s(t)$ (рис. 1.3):

$$S_d(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} s(kT)\delta(t - kT) \quad (1.18)$$

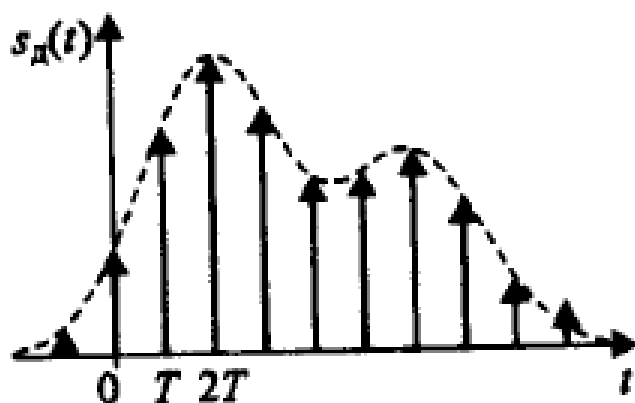


Рисунок 1.3 – Дискретизированный сигнал в виде последовательности дельта-функций.

Функция $\delta(t - kT)$ везде, кроме момента $t = kT$, равна нулю. В связи с этим в выражении (1.18) можно заменить константы $s(kT)$ на исходный аналоговый сигнал $s(t)$:

$$S_d(t) = s(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) \quad (1.19)$$

Сумма, которая входит в выражение (1.19), это периодический сигнал, и поэтому ее можно представить как ряд Фурье. Коэффициенты этого ряда будут равны:

$$\dot{C}_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \delta(t) e^{-j\omega_n t} dt = \frac{1}{T} \quad (1.20)$$

В формуле (1.20) учтено то, что в интервал интегрирования $(-T/2, T/2)$ попадает лишь одна дельта-функция, которая соответствует $k=0$. Следовательно, периодическую последовательность дельта-функций можно представить в виде комплексного ряда Фурье:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j\omega_n t},$$

(1.21)

где $\omega_n = 2\pi n/T$. Подставив (1.21) в (1.19), получается:

$$S_d(t) = \frac{s(t)}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{j\omega_n t} = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t) e^{j\omega_n t}. \quad (1.22)$$

Умножение сигнала на $e^{j\omega_n t}$ можно представить как сдвиг спектральной функции на ω_n , в связи с этим спектр дискретизированного сигнала может быть записан таким образом:

$$\dot{S}_d(\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \dot{S}\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right). \quad (1.23)$$

Получается, что спектр дискретизированного сигнала – это бесконечный ряд сдвинутых копий спектра исходного аналогового сигнала $s(t)$ (рис. 1.4). Расстояние между рядом стоящими копиями спектра по частоте равно частоте дискретизации $\omega_d = 2\pi/T$.

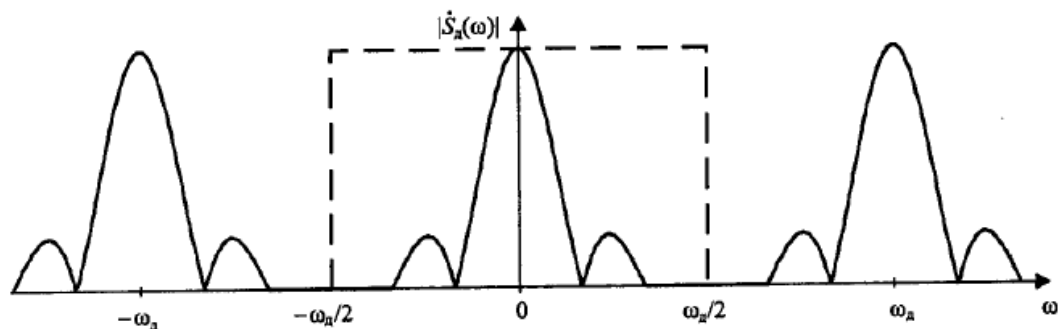


Рисунок 1.4 – Спектр дискретного сигнала

1.7 Дискретное преобразование Фурье

При работе с дискретными сигналами используют вид преобразования Фурье, имеющий название, дискретное преобразование Фурье (ДПФ). ДПФ широко используется при обработке сигналов в таких областях как: радиофизика, радиолокация, гидроакустика, обработка изображений и т.д.

Для вычисления спектра периодического дискретного сигнала его раскладывают в ряд Фурье.

$$\begin{aligned}
 \dot{X}(n) &= \frac{1}{NT} \int_0^{NT} s(t) e^{-j\omega_n t} dt = \frac{1}{NT} \int_0^{NT} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \delta(t - kT) e^{-j\omega_n t} dt = \\
 &= \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \int_0^{NT} \delta(t - kT) e^{-j\omega_n t} dt = \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j\omega_n kT} = \\
 &= \frac{1}{NT} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}}
 \end{aligned} \tag{1.24}$$

Формула для расчета комплексных амплитуд гармоник является линейной комбинацией отсчетов сигнала.

Реальный масштаб времени в выражении (1.24) присутствует только в множителе $1/T$, который стоит перед оператором суммирования. При оперировании с дискретными последовательностями обычно используют номера отсчетов и спектральных гармоник, не учитывая привязку к действительному масштабу времени и частоты. В связи с этим множитель $1/T$ убирают, т. е. считают частоту дискретизации равной единице. Множитель $1/N$ обычно тоже удаляют. Выражение, которое получается в итоге, называют дискретным преобразованием Фурье:

$$\dot{X}(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}} \tag{1.25}$$

Так же имеется обратное ДПФ. Преобразование из дискретного спектра во временные отсчеты сигнала определяется формулой:

$$x(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{X}(n) e^{j \frac{2\pi n k}{N}} \tag{1.26}$$

Формула обратного ДПФ отличается от прямого только присутствием множителя $1/N$ перед оператором суммирования и знаком в показателе комплексной экспоненты.

Для того чтобы вычислить один коэффициент ДПФ используя формулу (1.25) нужно произвести N комплексных умножений и сложений. Следовательно, для расчета полного ДПФ, который содержит N коэффициентов, потребуется N^2 пар действий «умножение-сложение». Число операций растет пропорционально квадрату размерности ДПФ. Впрочем, если N не будет являться простым числом и его можно разложить на множители, тогда процесс вычислений может быть ускорен, если разделить анализируемую выборку отсчетов на части, вычислить их ДПФ и объединить результаты. Такой способ вычисления ДПФ называют быстрым преобразованием Фурье (БПФ) и часто используют на практике.

При реализации БПФ существует несколько способов организации вычислений, которые зависят от способа разделения последовательности отсчетов на фрагменты (прореживание по частоте либо по времени) и от того, на сколько частей производится деление последовательности на каждом шаге (основание БПФ).

Самую большую степень ускорения вычислений можно достигнуть при числе элементов в анализируемой последовательности равным $N = 2^k$, в таком случае разбиение последовательностей на две части может быть продолжено до тех пор, пока не получатся последовательности из двух элементов. ДПФ таких последовательностей рассчитывается без использования действий умножения (достаточно вычислить сумму и разность двух отсчетов). Количество действий «умножение — сложение», которые требуются при этом, можно рассчитать как $N \cdot \log_2(N)$. Следовательно, вычислительные затраты уменьшаются в $N/\log_2(N)$ раз по сравнению с использованием формулы (1.25). При больших значениях N это отношение становится весьма велико.

При разбиении длины вектора на другие множители ускорение тоже возможно, но будет не таким значительным. Если длина вектора — простое

число, то вычисление спектра можно выполнить только по прямой формуле ДПФ.

Стоит отметить, что БПФ это не приближенный алгоритм, если будут отсутствовать вычислительные погрешности, то при расчете получится точно такой же результат, как и при использовании исходной формулы ДПФ. Ускорение достигается только благодаря оптимальной организации вычислений.

1.8 Корреляционный анализ

В ЦОС часто возникают задачи обнаружения одного сигнала в другом. Например, точно известно, что определенное внешнее событие генерирует в датчике сигнал известной формы. Однако различные события могут происходить почти одновременно, а сигналы от них – перекрываться. Плюс ко всему, на выходе датчика могут присутствовать шум и различные помехи, которые затрудняют определение нужных сигналов. В этом случае, для корректного выявления таких сигналов используется метод корреляции.

Корреляционный анализ служит для определения количественной меры сходства различных сигналов.

Автокорреляционная функция (АКФ, CF - correlation function). Термин «автокорреляция» применяется, когда находится корреляция сигнала с самим собой. Автокорреляция дает возможность оценить зависимость текущих значений сигнала от своих предыдущих и последующих значений, а также обнаружить в сигнале наличие периодически повторяющихся элементов.

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)x(t - \tau)dt \quad (1.26)$$

Где $x(t)$ – исходный сигнал;

$x(t - \tau)$ – его смещенная во времени копия.

Некоторые свойства автокорреляционной функции [4]:

- Функция $R(\tau)$ – чётная, т.е. $R(\tau)=R(-\tau)$.
- Если $x(t)$ – синусоида, её автокорреляционная функция – косинусоида с такой же частотой.
- Автокорреляционная функция связана со спектром мощности преобразованием Фурье.
- Если $x(t)$ является периодической функцией, то $R(\tau)$ можно представить как сумму автокорреляционных функций от постоянной составляющей и от синусоидально изменяющейся составляющей.
- Для случайной функции времени $R(\tau)$ быстро уменьшается с увеличением τ . Интервал времени, после которого $R(\tau)$ становится равным 0, называется интервалом автокорреляции.
- Заданной функции $x(t)$ соответствует вполне определённая $R(\tau)$ но для одной и той же $R(\tau)$ могут соответствовать различные функции $x(t)$;
- Максимальное значение АКФ соответствует $\tau=0$ и равно квадрату среднеквадратичного отклонения $K(0)=\delta^2$;
- Значение АКФ при $t=0$ равно энергии сигнала, то есть интегралу от его квадрата: $R_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t)dt = E$.

Взаимная корреляционная функция (ВКФ, CCF - cross-correlation function) разных сигналов описывает степень схожести формы двух сигналов и их взаимное расположение относительно друг друга по координате (независимой переменной). Если корреляционная функция сигналов равна нулю, то сигналы не зависимы друг от друга. Чем шире корреляционная функция, тем выше степень связи одного сигнала с другим.

Взаимная корреляционная функция вычисляется по формуле:

$$r_{xy}[k] = \frac{1}{N-k} \sum_{j=0}^{N-1-k} x_j \cdot y_{j+k}, \quad (1.27)$$

где N – размер массивов образцов сигналов. При больших значениях N рационально применять алгоритм Тоома-Кука на основе БПФ, как более

экономичный метод вычисления взаимной корреляционной функции [2]. Этот алгоритм можно описать следующей последовательностью.

Шаг 1. С помощью БПФ находятся дискретные преобразования Фурье обеих последовательностей:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad (1.28)$$

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) e^{-j2\pi nk/N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (1.29)$$

Шаг 2. Составляется новый массив данных:

$$P(k) = X(k) Y^*(k), \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (1.30)$$

Шаг 3. С помощью БПФ выполняется обратное преобразование Фурье

$$z(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P(k) e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (1.31)$$

Шаг 4. Получают оценку взаимной корреляционной функции:

$$r_{xy}(m) = \begin{cases} |z(m)|, & 0 \leq m < N/2 \\ |z(N-|m|)|, & -N/2 < m < 0 \end{cases} \quad (1.32)$$

Приведенная последовательность представляет собой алгоритм вычисления взаимной корреляционной функции, который оказывается удобным для микропроцессорной реализации.

Некоторые свойства взаимной корреляционной функции (ВКФ) [4]:

1) ВКФ не обязательно является симметричной, и её максимум может оказаться не в точке $x=0$.

2) $R_{xy}(\tau)$ не равно $R_{xy}(-\tau)$, т.е. ВКФ не является ни нечётной ни чётной функцией.

3) При изменении знака аргумента и перемене чередования функций ВКФ не изменяется т.е. $R_{xy}(\tau) = R_{xy}(-\tau)$.

4) Функции, которые создаются независимыми источниками и не содержат постоянных составляющих называются некоррелированными, для них $R_{xy}(\tau)$ стремится к 0.

Большое значение корреляционный анализ имеет при обработке случайных процессов для определения неслучайных компонентов и оценки неслучайных параметров этих процессов.

Корреляционный анализ применяется в различных областях, таких как: радиоастрономия, радиолокация, гидроакустика, сейсмология и т.д., так же его используют при решении задач обнаружения слабых зашумленных сигналов. Он применяется для вычисления спектральных характеристик сигналов и определения их идентичности, это нужно при исследованиях, которые связаны с измерением очень слабых сигналов. Корреляционный анализ широко применяется при решении задач неразрушающего контроля и диагностики, обработки цифровых изображений, определения параметров электрических систем.

2. Диагностика двигателя внутреннего сгорания

Современный автомобиль – это уникальный механизм, изготовленный из различных материалов, с высокой точностью обработки деталей. В процессе эксплуатации начальные свойства, характеристики и параметры машины изменяются. В связи с этим появляются проблемы, связанные с загрязнением окружающей среды, выбросами двигателей внутреннего сгорания (ДВС), безопасности эксплуатации, экономии топлива и т.д. Со временем в процессе эксплуатации из-за износа и возникновения различных неисправностей параметры работы ДВС начинают превышать эксплуатационные пределы.

Двигатель внутреннего сгорания является основным видом автомобильного двигателя. ДВС – это машина, которая преобразует тепловую энергию, образующуюся, при сгорании топлива в механическую работу.

В устройство двигателя входят следующие элементы: корпус, газораспределительный механизм, кривошипно-шатунный механизм и ряд систем (топливная, впускная, зажигания, охлаждения, смазки, система управления и выпускная система).

Корпус ДВС объединяет головку блока цилиндров и блок цилиндров. Кривошипно-шатунный механизм переводит возвратно-поступательное передвижение поршня во вращение коленчатого вала. Механизм газораспределения своевременно обеспечивает подачу в цилиндры топливно-воздушной смеси или воздуха и выпуск отработавших газов. Система впуска подает в двигатель необходимое количество воздуха. Топливная система предназначена для питания двигателя топливом. Общая работа этих систем обеспечивает формирование топливно-воздушной смеси. Система впрыска составляет основу топливной системы. В бензиновых двигателях система зажигания отвечает за принудительное воспламенение топливно-воздушной смеси. В дизельных двигателях смесь самовоспламеняется. Для снижения трения между сопряженными деталями двигателя используется система смазки. Система охлаждения обеспечивает охлаждение деталей двигателя, которые

нагреваются в процессе работы. Выпускная система отводит отработавшие газы от цилиндров двигателя, снижает их шум и токсичность. Электронное управление работой систем двигателя внутреннего сгорания обеспечивается системой управления двигателем.

Принцип работы ДВС основан на эффекте теплового расширения газов, которое возникает в процессе сгорания топливно-воздушной смеси и обеспечивает перемещение в цилиндре поршня. Работа поршневого ДВС происходит циклически. В четырехтактном двигателе полный рабочий цикл осуществляется за два оборота коленчатого вала и содержит четыре такта: впуск, сжатие, рабочий ход и выпуск. На тактах впуск и рабочий ход поршень движется вниз, а во время тактов сжатие и выпуск – вверх. Циклы работы во всех цилиндрах двигателя не совпадают по фазе, этим достигается равномерная работа ДВС. Во время такта впуск образовывается топливно-воздушная смесь в топливной и впускной системах. В разных конструкциях ДВС топливно-воздушная смесь образуется либо во впускном коллекторе, либо в самой камере сгорания. Топливно-воздушная смесь или воздух попадает в камеру сгорания во время открытия впускных клапанов механизма газораспределения, за счет разрежения, которое возникает при перемещении поршня вниз. Во время такта сжатия закрываются впускные клапаны, после этого топливно-воздушная смесь сжимается в цилиндрах двигателя. На такте рабочий ход топливно-воздушная смесь воспламеняется (самовоспламенение или принудительное воспламенение). В камере сгорания в результате горения образуется большое количество газов, давящих на поршень и заставляющих двигаться его вниз. Перемещение поршня через кривошипно-шатунный механизм преобразуется во вращательное движение коленчатого вала, которое затем используется для движения автомобиля. Выпускные клапаны газораспределительного механизма открываются на такте выпуск, через них отработавшие газы устраняются из цилиндров в выпускную систему, в которой происходит их охлаждение, очистка и снижение шума. После этого отработавшие газы попадают в атмосферу.

На мощность ДВС оказывают влияние следующие факторы: износ деталей газораспределительного и кривошипно-шатунного механизмов, а также цилиндропоршневой группы; обгорание и износ седел и клапанов; неисправности систем охлаждения, смазки и питания. Количественным показателем неисправной работы двигателя является понижение его мощности на 5-7%.

В ДВС цилиндропоршневая группа работает в самых тяжелых условиях (большие циклические нагрузки, высокая температура, газовая среда). Плюс ко всему происходит интенсивный износ деталей, что в свою очередь приводит к прорыву в картер газов из камер сгорания, росту вибрации и шума, уменьшению герметичности в надпоршневом пространстве, загрязнению моторного масла и увеличению его потери на угар.

Диагностирование цилиндропоршневой группы осуществляется по функциональным параметрам: прорыву газов в картер; изменению давления сжатия в цилиндрах; угару масла; утечкам сжатого воздуха, подаваемого в цилиндр; изменению вибрации и шума; разрежению в камере сгорания; величине тока, потребляемого стартером; изменению параметров моторного масла.

Диагностирование двигателя дает возможность определить состояние двигателя и принять решение о необходимости ремонта его механизмов. Диагностирование обеспечивает надежную работу двигателя и экономию средств на его обслуживание за счет уменьшения времени простоя из-за поломок и выполнения только действительно необходимых ремонтных работ по поддержанию его в работоспособном состоянии.

Главной причиной снижения эффективности работы автомобиля или его механизмов и агрегатов является изменение технических параметров, которые не всегда возможно измерить без разборки оборудования. Поэтому об изменении технического состояния судят по значениям диагностических параметров, которые позволяют определить состояние двигателя без разборки.

Диагностические параметры связаны определенными зависимостями, как со структурными параметрами, так и с эксплуатационными качествами двигателя. Знание зависимостей между структурными и диагностическими параметрами, понимание характера их изменения в процессе эксплуатации позволяют определять действительное состояние агрегатов без их разборки, прогнозировать остаточный ресурс и обоснованно назначать вид ремонта или объем технического обслуживания двигателя.

Необходимость капитального ремонта двигателя определяется износом деталей цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма, обычно капитальный ремонт двигателя сопровождается расточкой цилиндров, шлифовкой коленчатого вала, заменой поршней, поршневых колец заменой шатунных и коренных вкладышей и т.д.

Признаками, по которым определяется, необходимость ремонта двигателя являются увеличенный расход масла, дымление двигателя (прорыв газов в картер), увеличенный расход топлива, снижение мощности двигателя, затрудненный пуск зимой и т.д.

Способы диагностирования состояния двигателя внутреннего сгорания описываются во многих литературных источниках, например, в книге [5]. Эти способы дают возможность определить состояние отдельных систем, механизмов и сборочных единиц двигателя, в том числе: диагностирование кривошипно-шатунного механизма и механизма газораспределения, диагностирование цилиндропоршневой группы и клапанов механизма газораспределения, диагностирование смазочной системы, диагностирование системы охлаждения, диагностирование системы питания карбюраторного двигателя.

Далее представлены некоторые практические методы диагностирования неисправностей двигателя.

2.1 Диагностика неисправностей по внешним признакам

Работа неисправного двигателя характеризуется рядом внешних проявлений, выражающихся в изменении цвета выхлопных газов, наличии посторонних шумов и стуков, повышенном расходе эксплуатационных жидкостей, ухудшении основных рабочих характеристик (мощности, крутящего момента) и др.

2.1.1 Диагностика по цвету выхлопных газов

При работе исправного отрегулированного двигателя в тёплую погоду при нормальной влажности, выхлоп из глушителя бесцветный. Изменение цвета выхлопных газов может быть следствием неисправностей в механической части двигателя или его системах.

Сизый (голубовато-серый) дым выхлопа, как правило, свидетельствует о попадании моторного масла в камеру сгорания цилиндра сверх допустимой нормы. Масло сгорает вместе с рабочей смесью и в виде «сизого» дыма из глушителя выбрасывается в атмосферу. Чем больше масла попадает в цилиндры, тем интенсивнее «дымление» двигателя.

Серый или чёрный цвет выхлопных газов, как правило, указывает на неполное сгорание топлива в цилиндрах двигателя. Несгоревшее топливо, в виде копоти, осаждается на деталях двигателя (днищах поршней, электродах свечей зажигания и накаливания, клапанах) и в виде чёрного дыма выбрасывается в атмосферу. В выхлопных газах значительно возрастает доля вредных примесей (в основном CO, CH и C), ощущается характерный запах «несгоревшего топлива». Характеристики двигателя (мощность, крутящий момент, экономичность) ухудшаются.

Выхлопные газы белого цвета свидетельствуют о наличии в их составе паров воды.

2.1.2 Диагностика по шумам и стукам

При диагностике неисправностей речь идёт о нехарактерных для двигателя (или иного агрегата) шумах и стуках, т.е. о звуках, появление которых, вызвано неисправностью каких либо деталей, механизмов или систем. Источники шума работающего двигателя многообразны. Это и звук, впрыскиваемого форсунками топлива, и, всасываемого двигателем воздуха, и, взаимодействующих друг с другом деталей. С шумом, издаваемым двигателем, борются конструкторы и производители. На законодательном уровне большинства развитых стран, приняты законы, ограничивающие предельный уровень шума автотранспортных средств. Уровень шума двигателя возрастает по мере износа его деталей, из-за выхода из строя деталей или неисправности отдельных механизмов и систем. В основном, стуки и шумы являются следствием ослабления креплений и посадок, увеличения зазоров в сопряжении деталей. При диагностике неисправностей, которые проявляются в виде посторонних стуков и шумов, существует ряд определенных сложностей, и есть не так много специалистов, которые владеют и грамотно пользуются данным методом.

При диагностике двигателя нужно определить:

- Характер стука (периодический, нерегулярный или регулярный);
- Источник стука;
- Частоту стука по отношению к частоте вращения распределительного или коленчатого вала (равная, меньшая или большая);
- Тональность звука;
- Зависимость интенсивности стука (не зависит, уменьшается или увеличивается) от нагрузки, частоты вращения валов и температуры двигателя.

Полученная на основе прослушивания информация анализируется и сопоставляется с данными, полученными иными способами диагностирования. На основе сопоставления данных и анализа имеющихся признаков, делаются выводы о причинах появления стуков и возможных неисправностях.

2.1.3 Диагностика неработающего двигателя

Трудности, которые возникают при определении причин неисправности неработающего двигателя, заключаются в том, что невозможно оценить состояния двигателя как по внешним признакам (стукам и шумам, цвету выхлопных газов и т.п.), так и с помощью применения инструментальных методов диагностирования. Причин «нежелания» двигателя запускаться и работать, может быть достаточно много, но все они, обобщённо, связаны с неисправностью небольшого числа систем или механизмов. Зная конструкцию двигателя и принцип его работы, можно «вычислить» эти системы и «просчитать», их неисправности.

Запуск может быть невозможен по причине неисправностей:

- в системе пуска двигателя;
- в системе питания;
- в системе зажигания;
- в системе управления двигателем (зажиганием и впрыском топлива);
- в механической части двигателя.

Неисправности, имеющиеся в других системах двигателя (например, смазки или охлаждения), могут стать причинами появления неисправностей в его механической части, но непосредственно влиять на процесс пуска двигателя, не могут

2.2 Инструментальная диагностика

Инструментальная диагностика широко практикуемый метод определения неисправностей, по измеренным выходным параметрам и рабочим характеристикам двигателя и его систем. Замеры производятся с помощью специального оборудования и инструмента.

Прежде чем приступить к диагностированию двигателя, необходимо провести все необходимые регулировочные операции. Мощностные

характеристики исправного, но неотрегулированного двигателя могут снизиться до 20 – 30% от номинальных значений.

Общее техническое состояние двигателя оценивают по следующим факторам:

- эффективной мощности;
- давлению масла в системе смазки;
- удельному расходу топлива;
- содержанию вредных веществ в отработавших газах;
- общему уровню и спектру шумов и вибраций.

Если перечисленные параметры находятся в рабочих пределах, то двигатель пригоден для дальнейшей эксплуатации. В противном случае следует выполнить более детальную поэлементную проверку систем и механизмов двигателя на пример обнаружения конкретной неисправности.

2.2.1 Диагностирование неисправностей двигателя измерением давления в цилиндре в конце такта сжатия

Определение неисправностей деталей цилиндропоршневой группы и двигателя в целом по величине давления, развиваемого поршнем в цилиндре в конце такта сжатия, является одним из самых доступных, дешёвых и действенных способов, широко применяемого на практике. Величина давления (компрессии) в цилиндрах исправного и отрегулированного двигателя, имеющего степень сжатия в пределах 9 – 11 единиц, должна составлять 10 – 14 кгс/см². Она не должна быть ниже 10 кгс/см², и не должна отличаться по цилиндрам более чем на 1 кгс/см². Компрессия меньше названного значения «не запрещает» дальнейшую эксплуатацию автомобиля. Она лишь косвенно указывает на общий износ двигателя или на наличие в нём, каких либо неполадок.

На величину давления в цилиндре оказывают влияние такие неисправности как:

- поломка или износ деталей цилиндропоршневой группы;

- негерметичность клапанов;
- прогорание прокладки головки блока цилиндров;
- некоторые другие неисправности.

Причиной для измерения давления в цилиндре в конце такта сжатия могут служить признаки соответствующих неисправностей. Измерением компрессии, можно подтвердить или опровергнуть подозрения относительно наличия той или иной неполадки и, по возможности сделать соответствующие выводы о причинах её появления.

Прибор для измерения давления в цилиндре - компрессометр представляет собой манометр с обратным клапаном, вставленным в полую трубку с резиновым наконечником (или резьбовой частью) на конце и гайкой (клапаном) для выпуска воздуха (рис. 2.1).

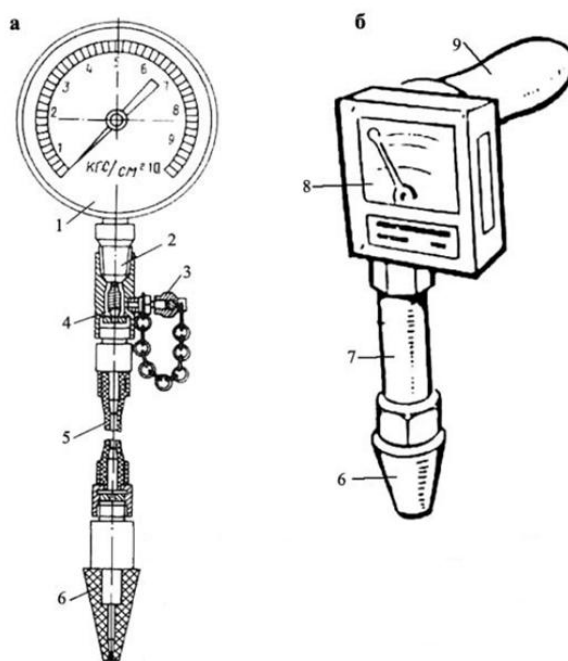


Рисунок 2.1 – Приборы для измерения компрессии в цилиндрах двигателя: а – компрессометр; б – компрессограф: 1) манометр; 2) штуцер; 3) колпачковая гайка; 4) обратный клапан; 5) резиновый шланг; 6) резиновый наконечник или резьба под свечное отверстие; 7) цилиндр с поршневым приводом самописца; 8) корпус самописца с картой для записи; 9) рукоятка прибора.

2.2.2 Диагностирование неисправностей двигателя измерением разряжения в цилиндрах и впускном коллекторе

Диагностирование неисправностей измерением разряжения в цилиндре, практически ничем не отличается от способа, изложенного выше с той лишь разницей, что измеряется не давление «рабочего тела», а вакуум, создаваемый поршнем при движении к нижней мертвой точке при закрытых клапанах. Для измерения используется вакуумметр, по внешнему виду почти идентичный компрессометру и который представляет собой манометр, вкрученный в трубку с резьбовым наконечником для присоединения к свечному отверстию. Вакуумметр имеет два клапана – редукционный (клапан «сброса» давления) и вакуумный. Выводы о наличии неисправностей деталей ЦПГ делаются на основе результатов, полученных при замере так называемого «полного» и «остаточного» вакуума и сравнения этих результатов между собой и с табличными значениями.

2.2.3 Диагностирование неисправностей двигателя измерением падения давления воздуха, подаваемого в цилиндры

Несложный метод, позволяющий надёжно выявлять неисправные цилиндры двигателя, подавая в них через свечное отверстие сжатый воздух под давлением 3 – 5 атмосфер, оценивая время падения давления и отслеживая каналы утечек воздуха. Простейший «тестер утечек» можно сконструировать из любого компрессора, способного развить указанное давление и, имеющего в своём составе манометр.

2.2.4 Диагностирование неисправностей двигателя измерением давления масла в системе смазки

С помощью этого показателя можно оценить износ деталей, сопряженных с кривошипно-шатунным механизмом, а также износ масляного насоса, редукционного клапана и подшипников распредвала. Этот показатель устанавливается производителем двигателя. Его измерение происходит с

помощью манометра, который подключают туда, где обычно находится штатный датчик давления.

2.2.5 Диагностирование неисправностей двигателя с помощью компьютерных диагностических комплексов (мотор-тестеров) и персональных электронных диагностических приборов

Мотор-тестеры используются для проведения комплексного диагностирования двигателя и его систем. Мотор-тестер позволяет получать информацию об относительной компрессии в цилиндрах двигателя, параметрах системы зажигания и управления впрыском топлива, величине стартерного тока в режиме прокрутки двигателя и напряжении аккумуляторной батареи, составе выхлопных газов, проводить баланс мощности цилиндров и выявлять неэффективно работающий цилиндр и т.п.. Мотор-тестеры умеют работать как цифровым осциллографом, так и мультиметром. Несколько меньшими возможностями обладают портативные мотор-тестеры, сканеры и имитаторы сигналов датчиков систем управления.

2.3 Виброакустическая диагностика

В последнее время широко используется виброакустическая диагностика ДВС. Большой объем информации о техническом состоянии работающего оборудования с различными вращающимися и подвижными узлами содержится в сигнале вибрации. По этой причине анализ вибросигналов стал основой одного из направлений технической диагностики оборудования, получившего название контроля состояния и диагностики машин. Это направление позволило расширить существующие методы неразрушающего контроля, дало возможности решать практические задачи долгосрочного прогноза состояния подвижных частей оборудования, а так же производить обслуживание и ремонт оборудования по фактическому состоянию.

Применение виброакустической диагностики помогает искать пути повышения качества конструкции самого изделия и технологии его изготовления [6].

Практически все поршневые машины относятся к оборудованию возвратно-поступательного действия. При этом каждый полный цикл работы такого оборудования включает в себя несколько временных фаз (интервалов), физические процессы в которых существенно отличаются. Например, это впуск рабочей смеси в цилиндр, ее горение, выпуск отработанных газов в двигателе внутреннего сгорания. На вибрационную картину работы поршневого двигателя накладываются специфические импульсные воздействия от работы системы газораспределения, а также динамическая неуравновешенность механической системы при перемещении масс (шатунно-поршневая группа, рабочая смесь). Все это приводит к тому, что большинство методов проведения измерений и алгоритмы диагностики, применяемые для оборудования непрерывного действия, например, насосов, вентиляторов, малоприменимы для поршневых машин. Необходимы другие подходы, учитывающие специфику возникновения вибрационных процессов в машинах возвратно-поступательного действия [7].

Средства вибрационного контроля и диагностики могут быть эффективно применены для анализа состояния поршневых машин возвратно-поступательного действия, но это возможно только с использованием специфических приборов и алгоритмов виброконтроля.

Обязательным условием для проведения вибрационной диагностики ДВС является применение многоканального синхронного считывания вибросигналов. Количество каналов считывания сигналов вибрации зависит от вида диагностируемого оборудования.

Необходимо определиться с частотным диапазоном вибродатчиков, которые нужно использовать при диагностике ДВС. Значение верхней границы регистрируемых частот обычно определяется размерами и массой элементов конструкции диагностируемого оборудования. Для поршневых двигателей основная часть собственных резонансных частот элементов охватывает

диапазон от сотни герц до двух - трех килогерц, что определяется массой и размерами элементов ДВС. Отсюда следует, что для диагностики состояния поршневых двигателей следует применять обычные вибродатчики. Граничная частота в 5 килогерц вполне достаточна для диагностики.

Более сложным вопросом является выбор нижней граничной частоты регистрации вибросигналов. Вибродатчик, установленный на двигателе, регистрирует в основном удары при изменении направления движения масс, удары в механизме газораспределения, вибрационные процессы при прохождении через клапана рабочего газа и т. д.. Нужно четко понимать то, что регистрируется, в основном, не столько сам удар, сколько его затухающий "отклик" в тех или иных элементах компрессора. Под словом "отклик" понимают свободные резонансные колебания в элементах после динамического удара. Собственные резонансные частоты элементов двигателя составляют сотни герц. Поэтому логичным является заключение, что нижняя граничная частота вибродатчиков для диагностики поршневых компрессоров должна быть не выше этого значения. Далее следует вывод, что для диагностики поршневых машин пригодны любые датчики (в вопросе ограничения нижней граничной частоты). Такой вывод объясняется тем, что серийно датчиков с граничной частотой менее 10 герц не выпускает ни одна компания.

Сигнал вибрации работающего механизма содержит большое количество информации о его состоянии. Для того, чтобы эффективно использовать эту информацию в программе технического диагностирования необходимо, должным образом извлечь ее из полученных вибросигналов.

Общий шумовой фон ДВС складывается из шумов отдельных агрегатов и механизмов, из которых состоит двигатель, а также шумов, которые возникают при процессах, происходящих в нем (впуск воздуха, воспламенение топлива, выпуск отработанных газов, и т. д.)

Большая часть составляющих шумового фона фазирована по времени, т.е. частота повторения пиков максимальной амплитуды будет зависеть от частоты вращения коленчатого вала [6].

В некоторой части составляющих шумов нет четко выраженной периодичности (прохождение воздуха мимо дроссельной заслонки) или присутствует случайный характер. В связи с этим, при анализе шума обязательно нужно синхронизировать его с положением коленчатого вала. При наличии фазовой диаграммы газораспределения, есть возможность определить причастность отдельных элементов шумового фона к узлам и агрегатам ДВС.

Максимально точно синхронизировать сигналы вибрации с положением коленчатого вала возможно при использовании фазового отметчика. Для некоторых типов двигателей внутреннего сгорания можно синхронизировать сигналы без использования отметчика, по некоторым характерным ударам, которые четко выделяются на графиках. В любом случае, заниматься диагностикой поршневых машин нельзя, пока не будет известна фазовая диаграмма работы с точностью до нескольких угловых градусов.

Для диагностики того или иного элемента конструкции из общего графика вибрационных процессов берется абсолютно конкретный временной участок, соответствующий данной фазе работы поршневой машины. Для реализации достоверной диагностики требуется зарегистрировать не менее 2 - 3 полных циклов работы оборудования. Только имея данные за такой период можно быть уверенным, что процесс является повторяющимся и удовлетворительным для диагностики.

Наиболее важной и достоверной является диагностика ДВС по форме вибросигналов в размерности виброускорения. Именно этот метод позволяет выявить временные фазы работы оборудования и четко выделить временные границы, в рамках которых диагностируется тот или иной дефект. Далее возможно применение других методов вибрационной диагностики, которые будут анализировать вибросигналы на выделенных интервалах времени. В некоторых случаях это спектральный анализ, в других модальный или вейвлет-анализ. Все зависит от типа выявляемого дефекта. Эти методы применяются к вибросигналам на отдельных, строго ограниченных интервалах времени. Если, например, взять спектр от всего вибросигнала, то локальные признаки дефекта

будут "размазаны" (уменьшены) в десятки раз, и вероятнее всего будут потеряны.

3. Разработка алгоритма частотно-временного автокорреляционного анализа

При обработке массивов данных больших размеров или для ускорения расчета корреляции, используют быструю корреляцию, для расчета которой используют теорему о корреляции и быстрое преобразование Фурье [8]:

$$K(\tau) = F^{-1}[F(x_i)F^*(x_i)], \quad (3.1)$$

где F^{-1} - обратное дискретное преобразование Фурье; F – прямое дискретное преобразование Фурье сигнала x_i ; F^* – комплексно-сопряженное значение результатов прямого дискретного преобразования.

В данном подходе нужно выполнить два дискретных преобразования Фурье и одно обратное ДПФ, это проще всего сделать, при использовании алгоритма БПФ. При достаточно большом числе членов в последовательностях этот метод БПФ дает более быстрый результат расчета, по сравнению с непосредственным расчетом взаимной корреляции.

Функции корреляции довольно просто определяются при помощи дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Продуктивность вычисления зависит от способа реализации ДПФ. Наибольшей эффективности можно достичь при использовании быстрого преобразования Фурье (БПФ). Главный недостаток этого метода расчета корреляционных функций это отсутствие информации о связи сигналов в частотной области. Такого недостатка нет в методе частотно-временного корреляционного анализа, применение которого позволяет на много увеличить информативность проводимого анализа.

Суть метода заключается в том, что прежде чем выполнить обратное преобразование Фурье для произведения $F(x_i)F^*(x_i)$, необходимо составить m копий этого произведения M^k , $k=0, \dots, m-1$, при этом кроме k -ой части, обнуляется весь спектр. В результате обратного преобразования Фурье каждой из этих копий получают автокорреляционную функцию на соответствующих частотах. Совокупность всех результатов обратного дискретного преобразования Фурье дает частотно-временную автокорреляционную

функцию [8]. Формула частотно-временной автокорреляционной функций определяется следующим видом:

$$\begin{aligned}
 K(f_k, t_i) &= Z_i^k, \\
 Z^k &= F^{-1}[M^k], \\
 M_j^k &= \begin{cases} P_j, & \frac{k}{m} \leq \frac{j}{2^{n-1}+1} < \frac{k+1}{m}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \\
 P_j &= F(x_i)F^*(y_i), \tag{3.2}
 \end{aligned}$$

где x_i и y_i – дискретные отсчёты входного сигнала, $i = 0, 1, \dots, 2^n - 1$,
 $j = 0, 1, \dots, 2^{n-1} + 1$, $k = 0, 1, \dots, m - 1$, $m = 1, 2, \dots, 2^{n-1}$, $n = 2, 3, \dots$

Блок-схема вычислений частотно-временной автокорреляционной функции приведена на рисунке 3.1.

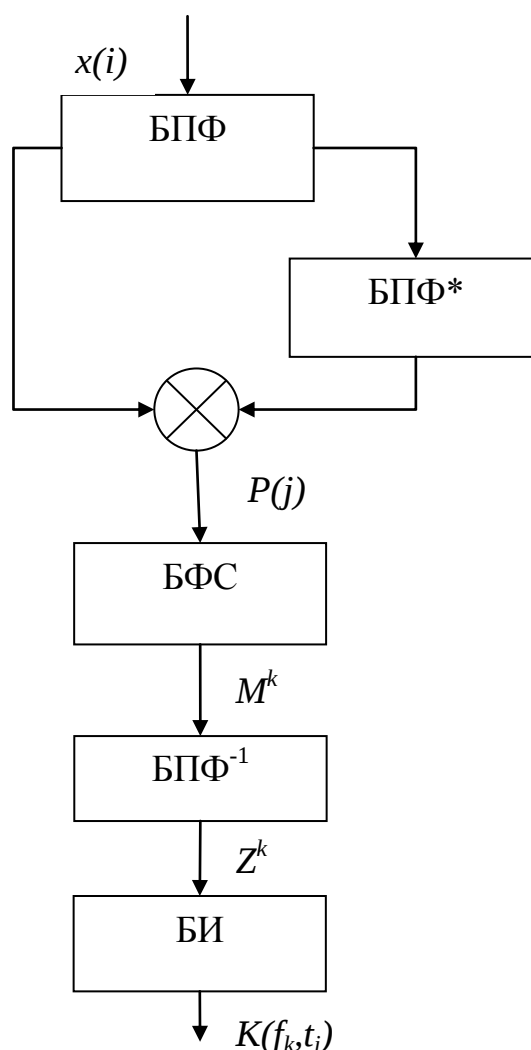


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма вычисления частотно-временной автокорреляционной функции: БПФ – блок, выполняющий прямое быстрое преобразование Фурье; БПФ* – блок вычисления комплексно сопряжённых чисел; БФС – блок формирования сигналов; БПФ⁻¹ – блок, выполняющий быстрое обратное преобразование Фурье; БИ – блок интерпретации

Прямое и обратное преобразования Фурье реализуется в форме быстрого преобразования Фурье (БПФ). Сигнал x_i с размерностью 2^n поступает на входы блока, выполняющего прямое быстрое преобразование Фурье (БПФ). Далее из полученного результата произведения прямого дискретного преобразования Фурье с его комплексно-сопряженным значением P_j в блоке формирования сигналов, выделяющем спектр каждой k -той части БФС формируются m сигналов M^k , где $j=0,1,...,2^{n-1}+1$; $m=1,2,...,2^{n-1}$; $k=0,1,...,m-1$. С

помощью обратного преобразования Фурье в блоке БПФ⁻¹ выполняется выражение $Z^k = F^{-1}[M^k]$ из полученных сигналов M^k . Блок интерпретации используется для определения частотно-временной корреляционной функции по результатам обратного преобразования Фурье.

$$K(f_k, t_i) = Z_i^k$$

где $t_i \in t_{\min}, t_{\max}$;

$$f_k \in f_{\min}, f_{\max} ;$$

$$t_i = \frac{i}{f_d};$$

$$f_k = \frac{k \cdot f_{\max}}{m-1};$$

$$t_{\min} = -\frac{2^{n-1}}{f_d};$$

$$t_{\max} = \frac{2^{n-1} - 1}{f_d};$$

$$f_{\min} = 0;$$

$$f_{\max} = \frac{f_d}{2^n};$$

f_d – частота дискретизации сигнала; $t_{\min}, t_{\max}$ – минимум и максимум возможных значений РВП для этого набора входных сигналов. В связи с тем, что сигналы на входе являются дискретными, результаты анализа могут описывать их взаимосвязь только в ограниченном диапазоне частот от $[0, f_{\max}]$ и ограниченном диапазоне времени $t_{\min}, t_{\max}$. Таким образом, полученный график частотно-временной автокорреляционной функции $K(f, t)$ визуально демонстрирует корреляцию гармонических составляющих исследуемого сигнала x_i на разных частотах.

3.1 Программная реализация частотно-временной корреляционной функции

Алгоритм частотно временной корреляционной функции реализован в пакете Mathcad 14.0.

Mathcad – программный пакет для проведения на компьютере разнообразных технических и математических расчетов, оснащенный дружественным графическим интерфейсом, который предоставляет пользователю инструменты для работы с числами, формулами, текстами и графиками. В пакете Mathcad возможно использовать более сотни логических функций и операторов, предназначенных для символьного и численного решения математических задач различной сложности.

Начиная с версии программы MathCAD 2001 появилась возможность считывать и записывать амплитуду акустических сигналов, записанных в звуковые файлы с расширением .wav:

- READWAV("file") - чтение звукового файла в матрицу;
- WRITEWAV("file",s,b) - запись данных в звуковой файл;

Запись звукового файла в матрицу осуществляется следующим образом:

```
filename := "D:\dvig\car5.wav"
```

```
Data := READWAV(filename)
```

Алгоритм вычисления частотно-временной корреляционной функции, реализован в Mathcad отдельными функциями:

- 1) БПФ* – блок получения комплексно сопряжённых чисел.

$$Y_{comp}(z) := \begin{cases} \text{for } i \in 0, 1..length(z) - 1 \\ z_i \leftarrow \operatorname{Re} z_i - i \cdot \operatorname{Im} z_i \\ z \end{cases}$$

В данной функции вычисляются комплексно-сопряженные числа сигнала после быстрого преобразования Фурье путем замены знака мнимой части каждого значения.

- 2) Блок умножения прямого дискретного преобразования Фурье сигнала с его комплексно-сопряженным значением.

$$P(x, y) := \begin{array}{|l} \text{for } i \in 0..\text{length}(x) - 1 \\ \quad p_i \leftarrow x_i \cdot y_i \\ \hline p \end{array}$$

В данной функции вычисляется произведение сигнала после быстрого преобразования Фурье с его комплексно-сопряженным значением.

- 3) БФС – блок формирования сигналов, в котором выделяется спектр каждой k-той части.

$$M(x, y, m, k) := \begin{array}{|l} \text{for } j \in 0, 1..\text{length}(x) - 1 \\ \quad \begin{array}{|l} M_j \leftarrow x_j \cdot y_j \text{ if } \frac{j}{\text{length}(x)} \geq \frac{k}{m} \wedge \frac{j}{\text{length}(x)} \leq \frac{k+1}{m} \\ M_j \leftarrow 0 \text{ otherwise} \end{array} \\ \hline M \end{array}$$

В данной подпрограмме составляется m копий произведения БПФ с его комплексно-сопряженным значением M^k . Перед составлением каждой копии обнуляется весь спектр сигнала, кроме k-ой части.

- 4) БПФ⁻¹ – блок, выполняющий быстрое обратное преобразование Фурье и БИ – блок интерпретации

```

Corr(x,y,m) :=
  X ← FFT(x)
  Y ← FFT(y)
  Yconj ← Ycomp(Y)
  for k ∈ 0,1..m-1
    Mxy ← M(X,Yconj,m,k)
    Mxy ← IFFT(Mxy)
    Mxy_tf⟨k⟩ ← Mxy
  for k ∈ 0..m-1
    tmp ← Mxy_tf⟨k⟩
    for q ∈ 0,1.. $\frac{\text{length}(x)}{2} - 1$ 
      tmp_vecq ←  $\left| \text{tmp}_{\frac{\text{length}(x)}{2}+q} \right|$ 
      tmp_vec $\frac{\text{length}(x)}{2}+q$  ←  $\left| \text{tmp}_q \right|$ 
    res_corr⟨k⟩ ← tmp_vec
  Z ← res_corrT
  Z

```

В этой подпрограмме выполняется прямое быстрое преобразование Фурье первого и второго сигналов. Затем вызывается подпрограмма для вычисления комплексно-сопряженных чисел второго сигнала. После этого вызывается функция для составления копий произведения M^k . На следующем шаге вычисляется обратное быстрое преобразование Фурье каждой из полученных копий. Далее по результатам обратного преобразования Фурье блоком интерпретации определяется частотно-временная корреляционная функция.

Программная реализация алгоритма вычисления частотно-временной корреляционной функции осуществлена в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.0. Условная модульная структура программы приведена на рисунке 3.2.

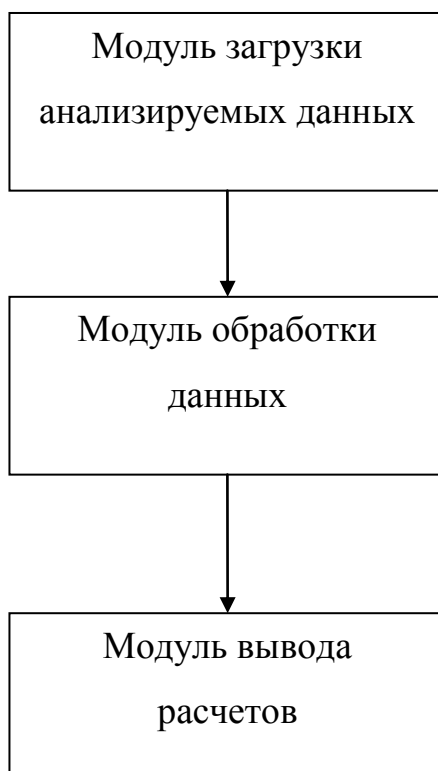


Рисунок 3.2 – Условная модульная структура разрабатываемого программного обеспечения

Для загрузки данных из звукового файла формата wav предназначен модуль загрузки анализируемых данных. В модуле цифровой обработки данных реализованы корреляционный анализ, фильтрация данных и частотно-временный корреляционный анализ. Модуль вывода результатов анализа отображает график частотно-временной корреляционной функции. Программа является исполняемым файлом Korrel.exe. Главная форма программы показана на рисунке 3.3.

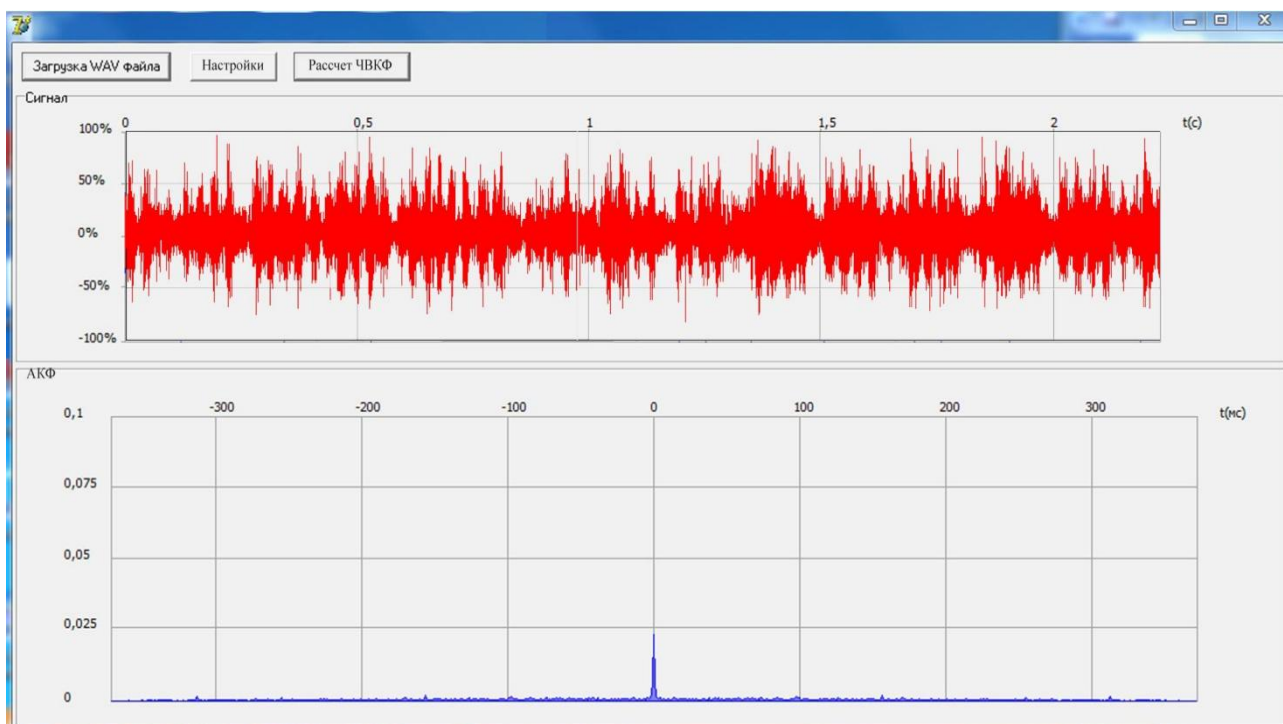


Рисунок 3.3 – Главная форма программы

Для загрузки звуковых сигналов, сохраненных в файлах формата WAV, необходимо нажать кнопку «Загрузка WAV файла».

Оператор может реализовать различные действия в процессе анализа в разработанном программном обеспечении. Главная форма состоит из двух частей:

«Сигнал»: в этой части показываются анализируемые сигналы. Для анализа можно выделять мышкой необходимую часть во временном домене. При двойном нажатии мышки можно переключать размер данной области на всю форму или обратно. Подобное действие также используется для второй области.

«АКФ»: в этой части показываются график автокорреляционной функции (рисунок 3.4). При нажатии левой кнопкой мыши можно увеличивать масштаб изображения, при нажатии правой кнопкой мыши – масштаб уменьшается.

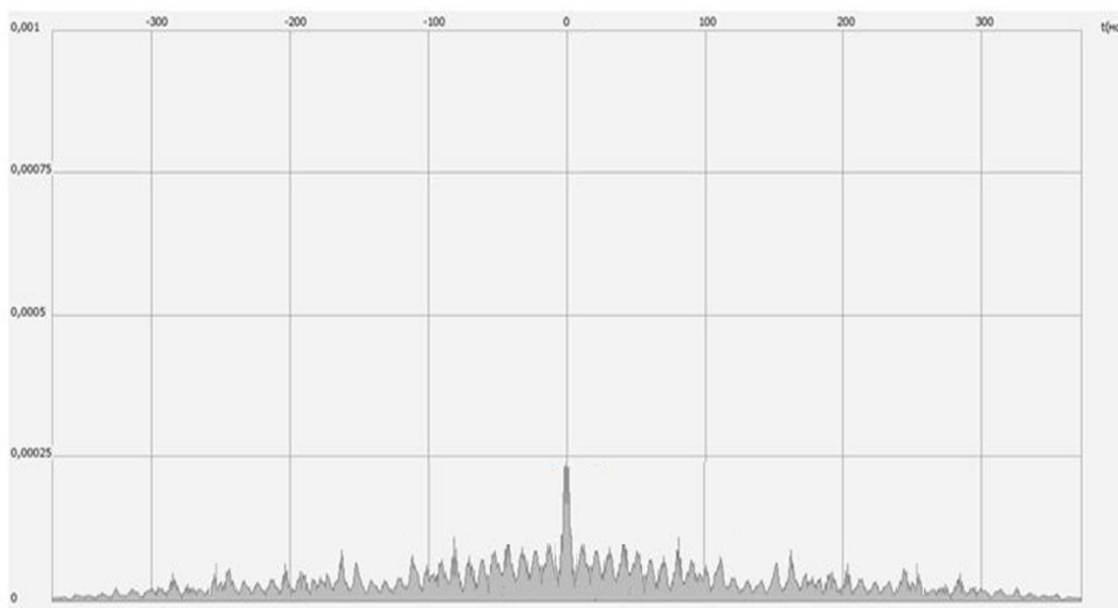


Рисунок 3.4 – График автокорреляционной функции

При нажатии кнопки «Настройки» на главной форме будет появляться окно для настройки программы (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Окно «настройки»

В окне настройки программы можно задавать следующие параметры:

- размер блока сигналов (2^n) и параметры для применения оконных функций;
- параметры для частотно-временного корреляционного анализа состоят из ширины полос, параметров для применения оконных функций, палитры для создания графика частотно-временной функции в виде разных цветов, выбора режима отображения графика частотно-временной корреляционной функции (2-D или 3-D).

При нажатии кнопки «Расчет ЧВКФ» на главной форме появится окно с отображением графика частотно-временной корреляционной функции в формате 2-D двухмерного изображения (рисунок 3.6) или формате 3-D трехмерного изображения (рисунок 3.7). Это зависит от настройки программы.

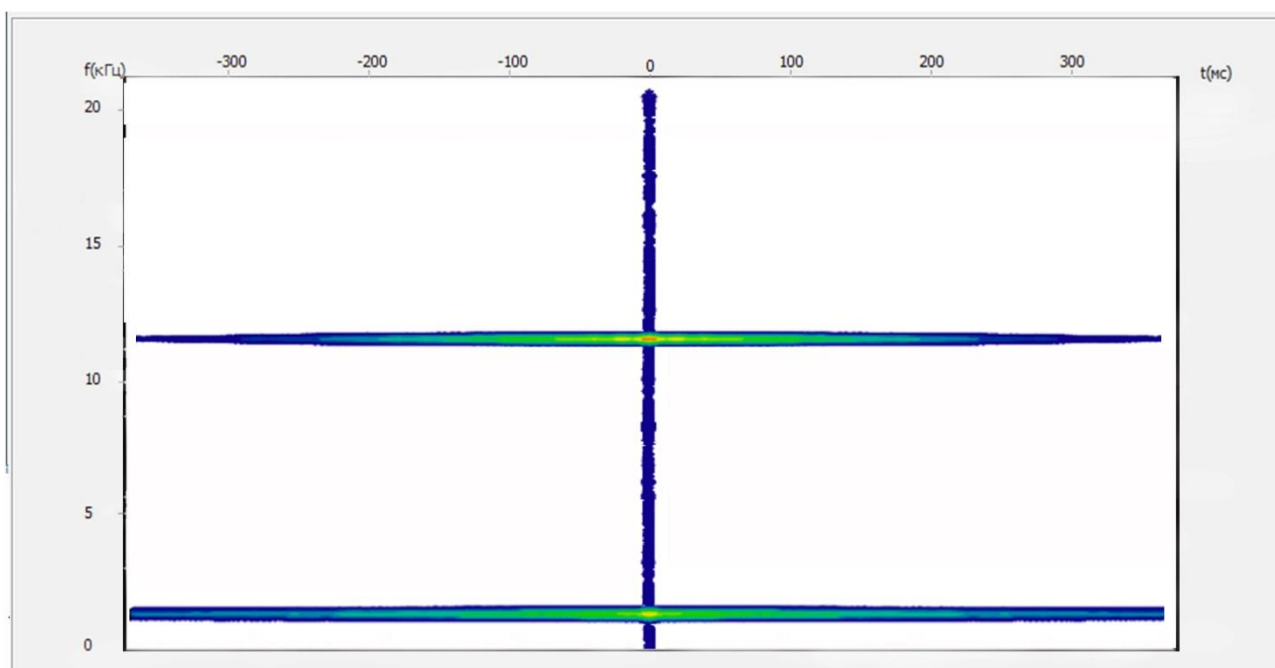


Рисунок 3.6 – График частотно-временной автокорреляционной функции

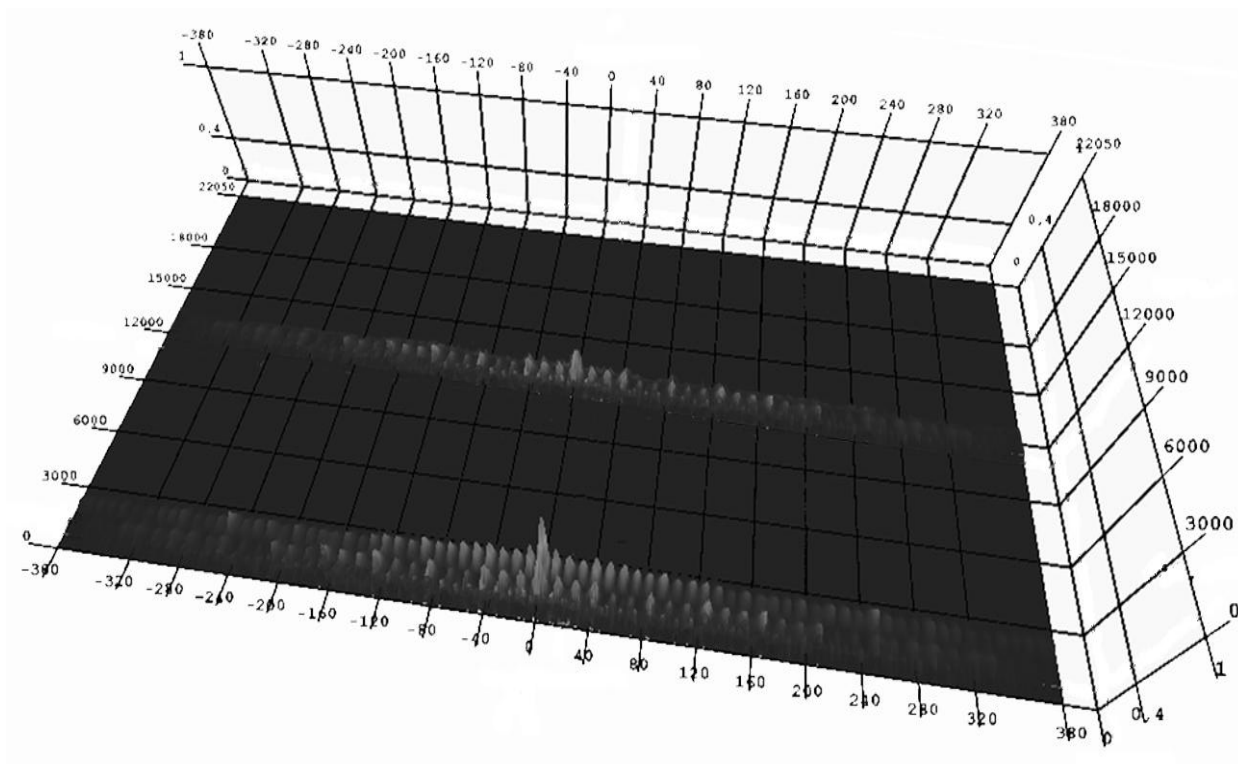


Рисунок 3.7 – 3-D График частотно-временной автокорреляционной функции

3.2 Тестовые примеры определения гармонических составляющих

Для проверки работоспособности разработанного алгоритма и корректности получаемых данных было рассмотрено несколько тестовых примеров определения гармонических составляющих в зашумленном сигнале из [1]. Исходные данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные и результаты расчета тестовых примеров

№ примера	Частоты гармонических составляющих, кГц	Расчетное значение частоты, Гц
1	5	5000,6
	6	6004,7
	7	7008,8
	8	7993,1
	9	8997,2
	10	10001,3

	20	20002,5
2	5	5000,6
	6	6004,7
	7	7008,8
	8	7993,1
	17	17010,0
	18	17994,4
	19	18998,4
	20	20002,5
3	1	1004,1
	2	1988,4
	3	2992,5
	9	8997,2
	10	10001,3
	11	11005,3
	18	17994,4
	19	18998,4
	20	20002,5

Частота дискретизации сигнала выбрана $f_d = 44100$ Гц. Это связано с тем, что слышимый диапазон для человеческого уха лежит в пределах 20—20000 Гц, а по теореме Котельникова [4] частота дискретизации аналогового сигнала должна быть как минимум в два раза больше максимальной частоты, которую может потребоваться передать, иначе при восстановлении аналогового сигнала форма восстановленного сигнала будет искажена. Таким образом, частота дискретизации должна быть более 40 кГц. Спектр у реальных финитных сигналов всегда бесконечно широкий. В связи с этим при дискретизации сигналов всегда происходит потеря информации, какую бы высокую частоту дискретизации не брали. Если подавить спектральные составляющие аналогового сигнала, которые лежат выше частоты Найквиста, то можно снизить искажения при выбранной частоте дискретизации, для этого требуется фильтр высокого порядка. Такой фильтр реализовать весьма сложно, так как

амплитудно-частотные характеристики фильтров имеют не прямоугольную, а гладкую форму, и образуется некоторая переходная полоса частот между полосой пропускания и полосой подавления. В связи с этим частоту дискретизации берут с небольшим запасом – 44100 Герц.

Алгоритмы быстрого преобразования Фурье работают наиболее эффективно с выборками, размерность которых является 2^n . Ширина окна БПФ выбрана $2^{14} = 16384$.

Количества формируемых сигналов m выбирают экспериментальным путем для решения конкретных задач и необходимой точности определения частот гармонических составляющих. Выбираем $m = 1121$, так же как в тестовых примерах

Амплитуды гармонических составляющих в тестовых примерах приняты равными единице. Результаты анализа тестовых примеров представлены в таблице 3.1 и приведены на рис. 3.8-3.10.

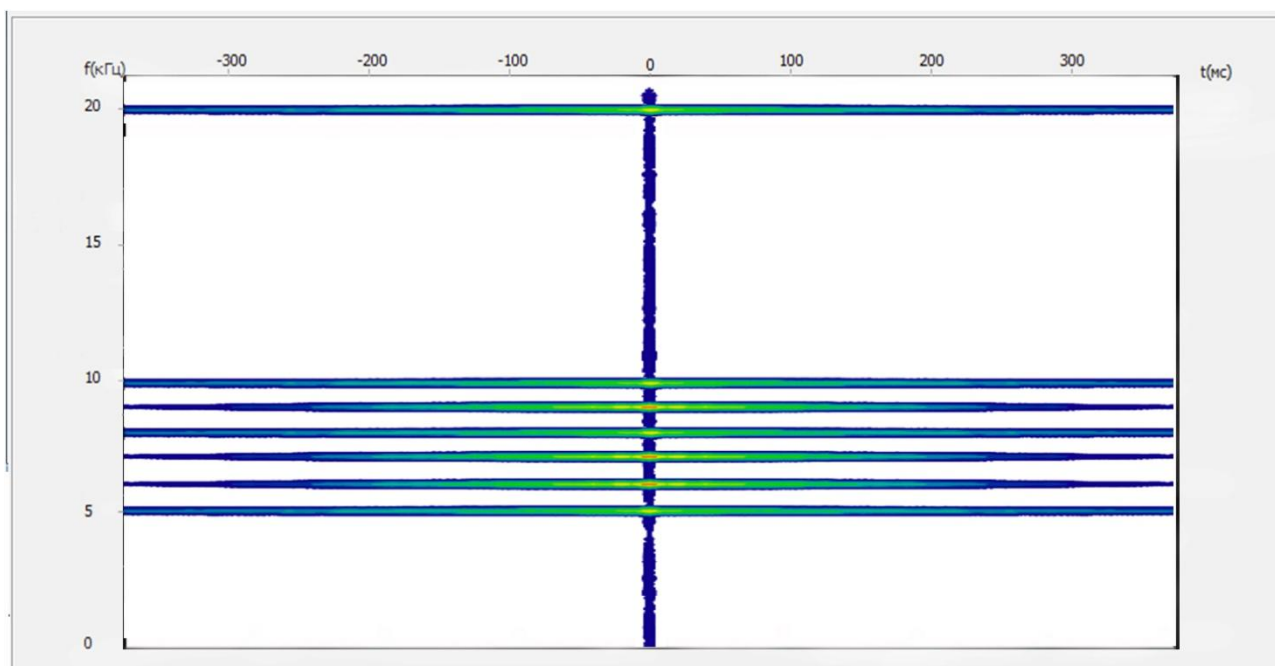


Рисунок 3.8 - Пример 1

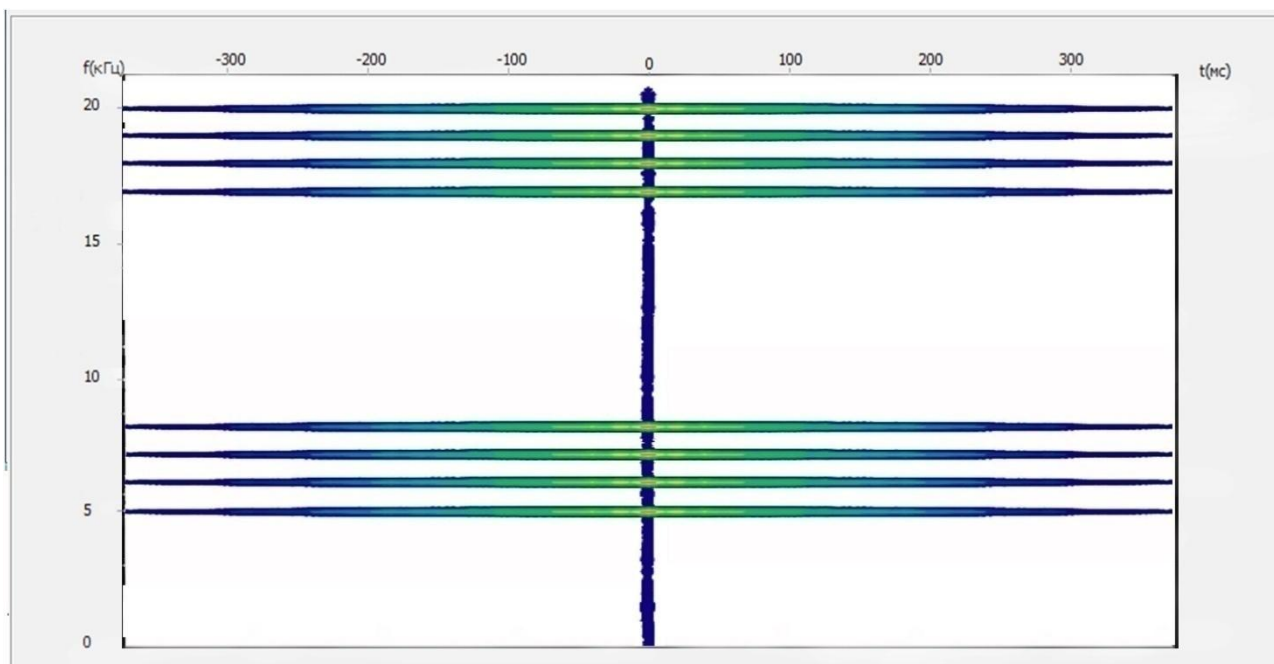


Рисунок 3.9 - Пример 2

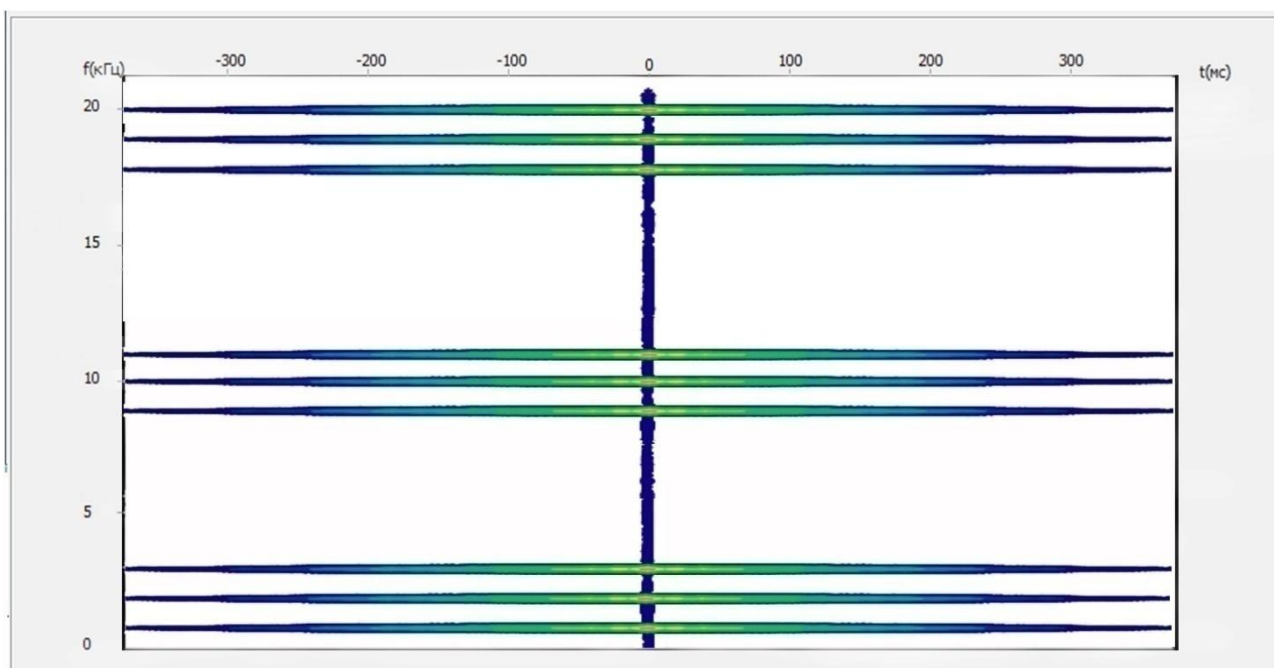


Рисунок 3.10 - Пример 3

На полученных графиках частотно-временной автокорреляционной функции, на частотах близких к тем, которые заданы в тестовых примерах, хорошо видны присутствующие в анализируемом сигнале гармоники в виде

линий. Полученные результаты полностью совпадают с результатами, приведенными в публикации [1], на основании этого можно сделать вывод, что разработанный алгоритм определения наличия гармонических составляющих работает и полученные данные корректны. Полученные экспериментальные значения частотно-временной автокорреляционной функции $K(\tau, f)$ отображены цветом: зеленым цветом показано максимальное значение, белым – минимальное, синим цветом отображены промежуточные значения.

3.3 Тестовые примеры вибродиагностики ДВС

Для проверки возможности применения частотно-временной корреляционной функции при диагностике ДВС было проведено исследование сигналов вибрации двигателя ВАЗ-21013 на примере публикации [8]. Основная задача эксперимента заключается в определении какого-нибудь периодического сигнала в общей шумовой картине работы двигателя. Источником такого сигнала была выбрана вибрация, вызванная вращением коленчатого вала. Это обусловлено тем, что частоту вращения легко можно проверить при помощи тахометра и сравнить расчетное значение параметра, которое получено по сигналу вибрации, с показаниями прибора. Исходный сигнал вибрации был получен с использованием вибропреобразователя ДН-3. Снятие сигналов вибрации производилось в окрестностях 1 и 4 цилиндров. Запись сигналов вибрации производилась на портативном компьютере с встроенным звуковым адаптером. Частота дискретизации сигнала была принята типовой и составляла 44100 Гц. С помощью штатного тахометра автомобиля была выставлена частота вращения коленчатого вала 1500 (об/мин). Размер выборки для быстрого преобразования Фурье был определен в $2^n = 2^{15} = 32768$ отсчета, интервал разбиения спектра составлял 500 Гц.

Результаты эксперимента показаны на рис. 3.11-3.13. На них приведены графики соответственно исходного сигнала, его автокорреляционной функции

и частотно-временной автокорреляционной функции, полученные для первого цилиндра.

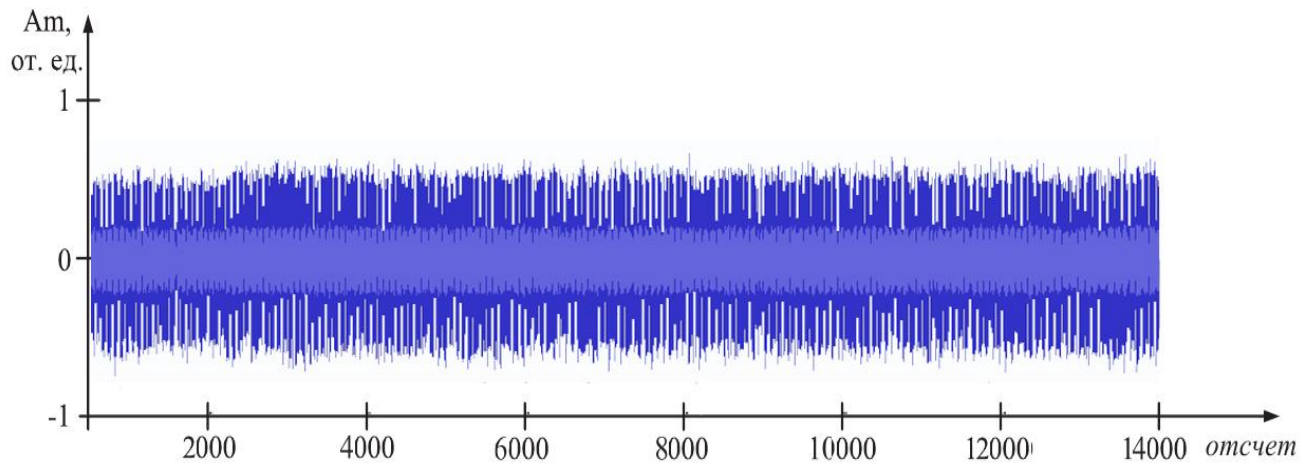


Рисунок 3.11 – Нормированный сигнал с выхода вибропреобразователя в окрестности первого цилиндра

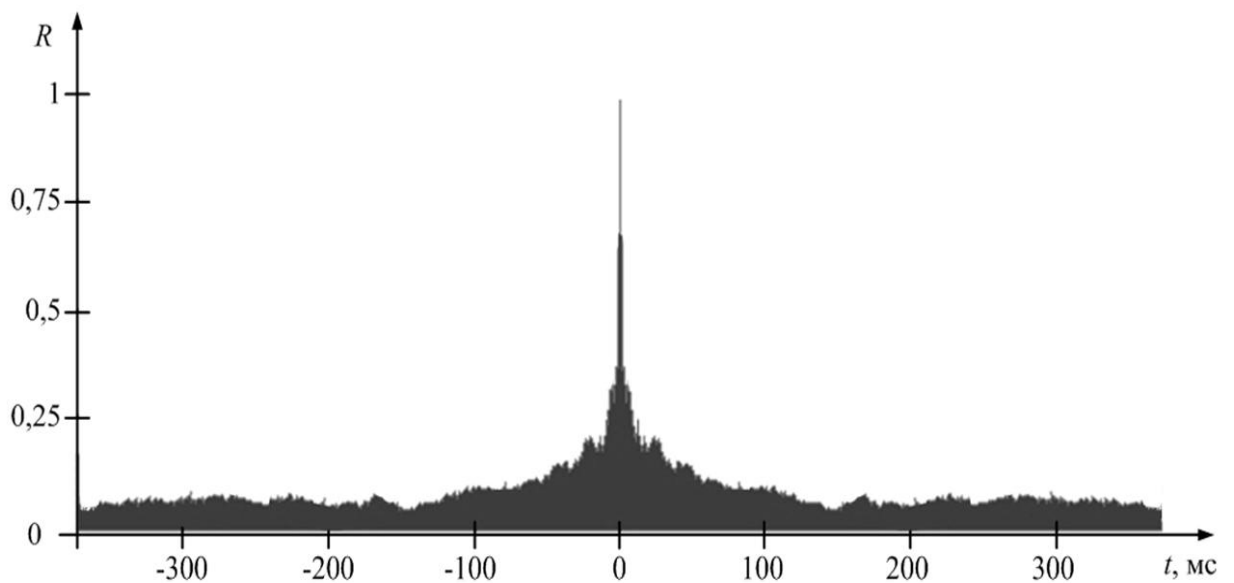


Рисунок 3.12 – Автокорреляционная функция анализируемого сигнала

По виду автокорреляционной функции анализ сигнала затруднителен, так как в общей шумовой картине уровень помех очень велик. Для обработки диагностического сигнала нужно снизить уровень шумов.

Снижение уровня помех можно решить, применив метод частотно-временной корреляционной функции. Такая функция получена по описанному выше алгоритму и представлена на рис. 3.13: черным цветом показано максимальное значение, белым – минимальное, серым цветом отображены промежуточные значения. По полученным экспериментальным результатам период одного оборота коленчатого вала составил $T_{об} \approx 38$ мс. Следовательно, количество оборотов коленчатого вала в минуту будет примерно равно 1579 об/мин. Полученный результат близок к показаниям тахометра. Небольшая погрешность в определении частоты вращения может быть обусловлена погрешностью определения частоты вращения по показаниям штатного тахометра.

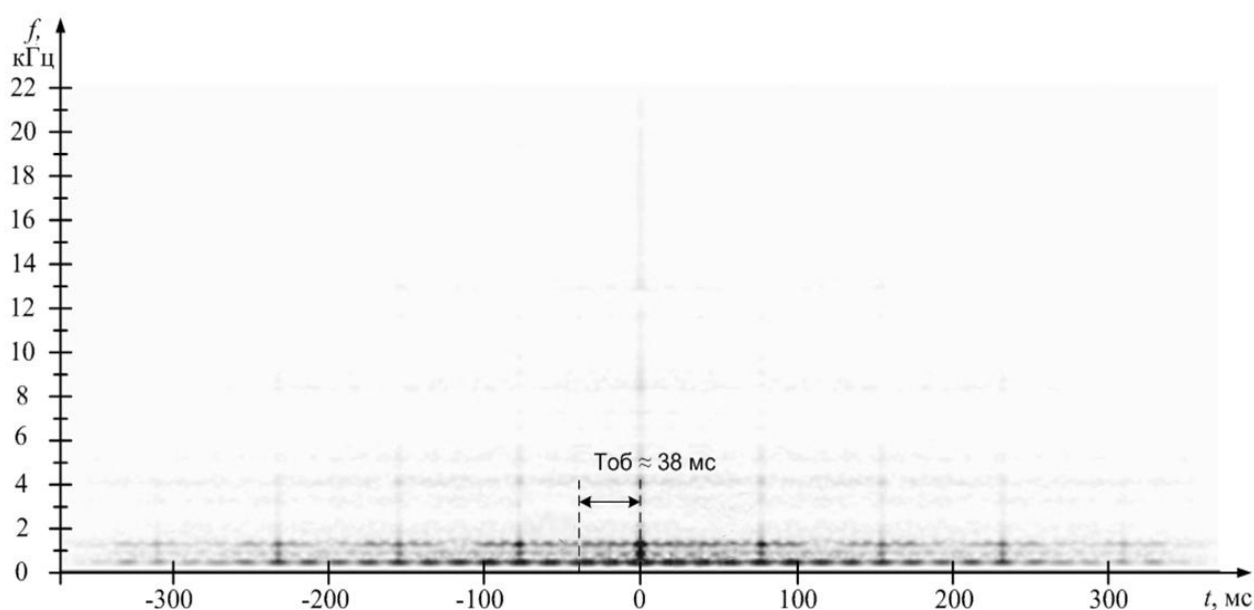


Рисунок 3.13 – Частотно-временная автокорреляционная функция анализируемого сигнала

Результат, полученный по расчетам, совпадает с результатами эксперимента из публикации [8], в связи с этим можно считать исследование успешным, так как установлена возможность применения предложенного подхода для определения периодических составляющих в сигналах вибрации ДВС, имеющих интенсивные шумовые помехи, которые не позволяют выявить такие составляющие традиционными средствами.

Проанализировав полученные графики можно сделать вывод о том, что при помощи частотно-временной корреляционной функции можно определить не только периодические составляющие в зашумленном сигнале, но и присутствие, периодически возникающих, импульсных сигналов, определить частотные диапазоны и период их возникновения. Совместное использование результатов спектрального и частотно-временного автокорреляционного анализа дает возможность выделить частотные диапазоны, в которых присутствует полезный сигнал, при необходимости настроить параметры частотных фильтров и произвести фильтрацию сигнала, а также определить гармонические составляющие, соответствующие процессам работы двигателя, например моментам воспламенения топлива в цилиндре.

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данном разделе рассматривается организация и планирование работ, оценка экономической эффективности разработки программного обеспечения для анализа периодических сигналов сложной формы. Данное программно обеспечение может применяться для диагностики сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания с целью определения текущего технического состояния агрегата и принятия решений о необходимости проведения профилактических и ремонтных работ

Цель данной работы - состоит в написании программного обеспечения, его тестировании, проведении технических экспериментов.

Для достижения поставленной цели были проведены исследования и решены следующие задачи:

- организация и планирование работ;
- проведение расчета трудоемкости выполнения работ;
- составление плана комплекса работ;
- расчет затрат на проектирование, заработной платы и прочих расходов;
- расчет затрат на внедрение разработки;
- оценка экономической эффективности разработки.

4.1 Организация и планирование работ

Планирование работы заключается в составлении полного перечня работ, необходимых для достижения поставленной задачи; определение участников каждой работы; установление продолжительности работ; построение линейного графика. Успех проведения работы зависит от рационального распределения нагрузки по времени этапов, что позволяет более

эффективно распределять и использовать ресурсы её исполнителей; предварительно определить затраты на проведение НИР.

Предполагаемые в процессе исследования работы объем на стадии, и данные сведем в таблицу 4.1

Таблица 4.1 - *Перечень работ и продолжительность их выполнения*

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка задачи, поиск литературы	НР	НР – 100% И – 30%
Ознакомление с литературой	НР, И	НР – 30% И – 70%
Разработка алгоритма программы	НР, И	НР – 50% И – 75%
Написание программы	НР, И	НР – 30% И – 100%
Проведение экспериментальных исследований	НР, И	НР – 50% И – 75%
Редактирование и отладка программы	НР, И	НР – 25% И – 100%
Мероприятия по безопасности и экологичности работы	И	И – 100%
Технико-экономическое обоснование НИР	И	И – 100%
Составление и оформление пояснительной записки	И	И – 100%
Разработка презентации	И	И – 100%
Защита ВКР.	И	И – 100%

4.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ может осуществляться двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

Первый применяется в случаях наличия достаточно развитой нормативной базы трудоемкости планируемых процессов, что в свою очередь обусловлено их высокой повторяемостью в устойчивой обстановке. Так как в этой работе мы не располагаем соответствующими нормативами, то используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

Аналоговый способ привлекает внешней простотой и околонулевыми затратами, но возможен только при наличии в поле зрения исполнителя ВКР не устаревшего аналога, т.е. проекта в целом или хотя бы его фрагмента, который по всем значимым параметрам идентичен выполняемой ВКР. В большинстве случаев он может применяться только локально – для отдельных элементов (этапов работы).

Экспертный способ расчета продолжительности этапов работ предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию. Для определения вероятных (ожидаемых) значений продолжительности работ $t_{ож}$ применяется следующая формула:

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4 \cdot t_{prob} + t_{max}}{6} \quad (4.1)$$

где t_{min} – минимальная продолжительность работы, дн.;

t_{max} – максимальная продолжительность работы, дн.;

t_{prob} – наиболее вероятная продолжительность работы, дн.

Для выполнения перечисленных в таблице 4.1 работ требуются специалисты:

- инженер – в его роли действует исполнитель ВКР;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ($T_{РД}$) ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д} \quad (4.2)$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{ВН}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, принимаем $K_{ВН} = 1$;

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ. $K_{Д} = 1,2$.

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (4.3)$$

где $T_{КД}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$ – коэффициент календарности, позволяющий перейти от длительности работ в рабочих днях к их аналогам в календарных днях, и рассчитываемый по формуле

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}} \quad (4.4)$$

где $T_{КАЛ}$ – календарные дни ($T_{КАЛ} = 366$);

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 14$).

$$T_{К} = \frac{366}{366 - 52 - 14} = 1,22$$

Таблица 4.2 - Трудозатраты на выполнение проекта

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		2	3	4	5	6	7	8	9
1	Постановка задания, поиск литературы	НР	2	3	2,17	2,604	0,78	3,18	0,95
2	Ознакомление с литературой	НР, И	2	3	2,83	1,02	2,38	1,24	2,9
3	Разработка алгоритма программы	НР, И	9	12	10,83	6,5	9,747	7,93	11,89
4	Написание программы	НР, И	5	8	6.17	2,22	7,404	2,71	9,03
5	Проведение экспериментальных исследований	НР, И	4	7	6,83	4,098	6,147	5,00	7,5
6	Редактирование и отладка программы	НР, И	7	12	9,83	2,95	11,8	3,6	14,4

Продолжение таблицы 4.2

7	Мероприятия по безопасности и экологичности работы	НР, И	6	9	7,17	-	8,604	-	10,5
8	Технико-экономическое обоснование НИР	И	6	9	7,17	-	8,604	-	10,5
9	Составление и оформление пояснительной записки	И	18	20	19,67	-	23,6	-	28,78
10	Разработка презентации	НР, И	3	5	4	-	4,8	-	5,85
11	Защита ВКР.		4	5	4,17	-	5	-	6,1
	Итого:					19,392	88,866	23,66	108,4

Таблица 4.3 - *Линейный график работ*

Этап	НР	И	Март			Апрель			Май			Июнь		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
1	3,18	0,95	■											
2	1,24	2,9	■											
3	7,93	11,89		■										
4	2,71	9,03			■									
5	5,00	7,5				■								
6	3,6	14,4					■							
7	-	10,5						■						
8	-	10,5							■					
9	-	28,78								■				
10	-	5,85											■	
11	-	6,1												■

НР ■; И – ■

4.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Цель данного пункта – оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (i-го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Вводятся обозначения:

- $TP_{общ.}$ – общая трудоемкость проекта;
- TP_i (TP_k) – трудоемкость i-го (k-го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;
- TP_iH – накопленная трудоемкость i-го этапа проекта по его завершении;
- TP_{ij} (TP_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j-м участником на i-м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, в нашем примере $m = 2$.

Степень готовности определяется формулой (5.5)

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}. \quad (4.5)$$

Применительно к таблице (4.2) величины TP_{ij} (TP_{kj}) находятся в столбцах (6, $j = 1$) и (7, $j = 2$). $TP_{общ.}$ равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Расчет TP_i (%) и CG_i (%) на основе этих данных содержится в таблице (4.4).

Таблица 4.4 - *Наращение технической готовности работы и удельный вес каждого этапа*

Этапы работы	TP_i , %	CG_i , %
Постановка задания, поиск литературы	3,126	3,126
Ознакомление с литературой	3,14	6,27
Разработка алгоритма программы	15	21,27
Написание программы	9	30,16

Продолжение таблицы 4.4

Проведение экспериментальных исследований	9,46	39,63
Редактирование и отладка программы	13,62	53,25
Мероприятия по безопасности и экологичности работы	7,95	61,2
Технико-экономическое обоснование НИР	7,95	69,15
Составление и оформление пояснительной записки	21,8	90,95
Разработка презентации	4,43	95,38
Защита ВКР.	4,62	100

4.2. Расчет сметы затрат на выполнение проекта

В состав затрат на создание проекта включается величина всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости ее выполнения производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;
- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

4.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. В данной работе ни какие материалы и изделия не приобретаются, т.к. работа заключается в разработке программного обеспечения. В связи с этим данную статью затрат не рассчитываем.

4.2.2 Расчет заработной платы

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 ($ЗП_{дн-т}$) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн-т} = МО/24,83$$

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

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4.5. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 4.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{пр} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,188$; $K_p = 1,3$. 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 $K_{и} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{доп.ЗП}$ применяется при шестидневной рабочей неделе.

Таблица 4.5 - Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб.день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	20 099,86	804,00	20	1,699	27319,92
И	13 824,00	552,96	89	1,699	83613,64
Итого:					110933,56

4.2.3 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 $C_{\text{соц.}} = 110933,56 \cdot 0,3 = 33280,07$ руб

4.2.4 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.

Для ТПУ $Ц_{\text{э}} = 5,257$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 4.2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_{\text{т}} \quad (4.8)$$

где $K_{\text{т}} \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно

определение $t_{об}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{ном.} * K_C \quad (4.9)$$

где $P_{ном.}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Таблица 4.6 - *Затраты на электроэнергию технологическую*

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $\mathcal{E}_{об}$, руб.
Персональный компьютер	712*0,6	0,3	673,74
Итого:			673,74

4.2.5 Расчет амортизационных расходов

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

Используется формула

$$C_{ам} = \frac{H_A * \mathcal{C}_{об} * t_{рф} * n}{F_d}$$

где H_A – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$\mathcal{C}_{об}$ – 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} . Для ПК в 2016 г. (300 рабочих дней при шестидневной рабочей неделе) можно принять $F_d = 300 * 8 = 2400$ часа;

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

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

Для ПК примем срок амортизации 2,5 года, тогда $N_A = 1/2,5 = 0,4$

Балансовая стоимость ПК = 18799

$$C_{AM} = \frac{0,4 * 18799 * 712 * 1}{2400} = 2230,81$$

4.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)

Сюда относятся:

- командировочные расходы, в т.ч. расходы по оплате суточных, транспортные расходы, компенсация стоимости жилья;
- арендная плата за пользование имуществом;
- оплата услуг связи;
- услуги сторонних организаций.

Норма оплаты суточных – 100 руб./день.

В данной работе расходов на основе платежных документов не было.

4.2.7 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.

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

Для нашего примера это

$$C_{проч} = (110933,56 + 33280,07 + 673,74 + 2230,81) * 0,1 = 14711,82$$

4.2.8 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Разработка программного обеспечения для диагностики сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания»

Таблица 4.7 - Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	0
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	110933,56
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	33280,07
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	673,74
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	2230,81
Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	0
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	14711,82
Итого:		161830,00

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 161830,00$ руб.

4.2.9 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта в зависимости от конкретной ситуации (масштаб и характер получаемого результата, степень его определенности и коммерциализации, специфика целевого сегмента рынка и т.д.) может определяться различными способами. Так как мы не располагаем данными для применения «сложных» методов, то прибыль следует принять в размере $5 \div 20$ % от полной себестоимости проекта.

$$161830,00 * 0,2 = 32366 \text{ руб.}$$

4.2.10 Расчет НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это

$$(161830 + 32366) * 0,18 = 34955,28$$

4.2.11 Цена разработки ВКР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае

$$Ц_{ВКР} = 161830 + 32366 + 34955,28 = 229151,28$$

4.3. Оценка экономической эффективности проекта

Данный проект не ориентирован непосредственно на экономический результат. В работе показана принципиальная возможность использования частотно-временной автокорреляционной функции для анализа периодических сигналов сложной формы.

Применение частотно-временной корреляционной функции при анализе вибросигналов оборудования дает возможность получать показатели и характеристики, которые отражают, техническое состояние машин. Задачу диагностики можно ставить намного шире, анализируя работоспособность и состояние вспомогательных систем двигателя, например, системы впрыска или системы зажигания. Для расширения функциональных возможностей данного метода такие испытания можно проводить для различных режимов работы двигателя внутреннего сгорания.

Применение рассмотренного частотно-временного автокорреляционного метода расширяет область применения математического аппарата корреляционного анализа при исследовании сложных процессов, которые характеризуются сигналами импульсного и полигармонического характера.

5. Социальная ответственность

В данной выпускной квалификационной работе производится разработка программного обеспечения для анализа периодических сигналов сложной формы. В частности данное программное обеспечение можно применить для диагностики сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания с целью определения текущего технического состояния агрегата и принятия решений о необходимости проведения профилактических и ремонтных работ.

Работа заключается в разработке алгоритма, написании программного обеспечения, его тестировании и отладки.

5.1. Производственная безопасность

Разработанное программное обеспечение может использоваться в автомастерских для диагностики состояния машин. Далее рассмотрены опасные и вредные факторы, которые могут возникнуть при использовании программы для диагностики ДВС.

Таблица 5.1- Опасные и вредные факторы при выполнении работ по диагностике сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
1. Разработка программного обеспечения	1. повышенный уровень электромагнитных излучений 2. повышенная ионизация воздуха 3. повышенный уровень шума на рабочем месте		СанПиН 2.2.2.542-96 СН 2.2.4/2.1.8.562–96.

При работе с программным обеспечением для анализа периодических сигналов сложной формы большой объем времени человек проводит за работой на компьютере, анализируя полученные результаты частотно-временной корреляционной функции. Опасные факторы при работе на компьютере:

- Повышенный уровень электромагнитных излучений
- Повышенная ионизация воздуха
- Зрительное напряжение

5.1.1 Повышенный уровень электромагнитных излучений

Как любые электрические приборы, мониторы и системные блоки производят электромагнитное излучение. Большая часть его происходит не от экрана монитора, а от видеокабеля и системного блока. Современные машины выпускаются заводом-изготовителем со специальной металлической защитой внутри системного блока для уменьшения фона электромагнитного излучения.

Согласно [1] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50см вокруг видеотерминала по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц ÷ 2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц ÷ 400кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц ÷ 2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц ÷ 400кГц – 25 нТл.

5.1.2 Повышенная ионизация воздуха

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является монитор. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, торможение функций кроветворных органов и увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение сопротивляемости организма инфекционным заболеваниям и др.

Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50 мкбэр/час. По нормам [1] конструкция видеомонитора и ЭВМ должна обеспечивать

мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана и корпуса видеотерминала не более $7,7 \cdot 10$ А/кг.

5.1.3 Напряжение глаз

Работа за компьютером сопровождается постоянным напряжением функций зрительного анализатора. Одной из основных особенностей работы за компьютером является иной принцип чтения информации, чем при обычном чтении. При работе на ПК глаза пользователь смотрят на изображение (источник — люминесцирующее вещество экрана), которое формируется по другую сторону экрана, поэтому пользователь не считывает отраженный текст, а смотрит непосредственно на источник света, что вынуждает глаза и орган зрения в целом работать в несвойственном ему стрессовом режиме длительное время.

Расстройство органов зрения резко увеличивается при работе более четырех часов в день. Всемирная организация здравоохранения ввела понятие “компьютерный зрительный синдром”, типовыми симптомами которого являются покраснение век и конъюнктивы, жжение в глазах, боли в области глазниц и лба, чувство инородного тела или песка под веками, замедленная перефокусировка с ближних объектов на дальние, затуманивание зрения. Рекомендации по организации работы и отдыха при работе за компьютером указаны в [6].

Меры для профилактики заболеваний глаз:

- Стол следует поставить сбоку от окна так, чтобы свет падал слева. Наилучшее освещение для работы с компьютером — рассеянный непрямой свет, который не дает бликов на экране;
- экран монитора должен быть абсолютно чистым;
- центр экрана должен быть примерно на уровне глаз или чуть ниже;
- периодически, на несколько секунд нужно закрывать глаза для отдыха, через 45-60 минут нужно дать глазам 5-10 минут отдыха;
- экран монитора должен быть удален от глаз на 50-60 сантиметров.

5.1.4 Требования к шуму и вибрациям в помещениях

При установке вибродатчиков и анализе поступающего с них сигнала работающий двигатель автомобиля служит источником повышенного шума и вибрации, эти факторы непосредственно действуют в зоне моторного отделения. Уровень шума на рабочих местах должен не превышать значений, которые установлены [3] и должны составлять не более 50 дБА.

Методы защиты от шума основаны на:

- 1) снижении шума в источнике;
- 2) снижении шума на пути его распространения от источника;
- 3) применении СИЗ от шума (СИЗ — средство индивидуальной защиты).

Понизить уровень шума в помещениях возможно при использовании звукопоглощающих материалов с максимальными коэффициентами звукопоглощения в области частот 63-8000 Гц для отделки потолка и стен помещений. Если стены помещения или перекрытия выполнены из светопрозрачных материалов, а применение звукопоглощающих облицовок невозможно, то применяют поглотители шума, выполненные в виде объемных тел различной конфигурации, эти устройства бывают пористыми, пористо-волокнистыми, мембранными, слоистыми, объемными и т. п. Обычно их подвешивают равномерно к потолку на определенной высоте

5.2 Экологическая безопасность

Мероприятия по охране окружающей среды направлены на сохранение, восстановление природных богатств, рациональное использование природных ресурсов и предупреждение вредного влияния результатов хозяйственной деятельности общества на природу и здоровье человека. Сущность охраны окружающей среды состоит в установлении постоянной динамической гармонии между развивающимся обществом и природой, служащей ему одновременно и сферой и источником жизни.

Программное обеспечение для анализа вибросигналов позволяет обнаружить технические неисправности ДВС, что позволяет предупредить серьезные поломки в оборудовании и проводить ремонт по фактическому состоянию машины. В связи с этим уменьшается расход материальных ресурсов, которые требуются для ремонта двигателя, и как следствие уменьшается количество отходов, которые могут попасть, как загрязнители, в лито- или гидросферу и уменьшается потребность в производстве новых запчастей. Так же уменьшаются энергетические затраты на проведение ремонтных работ.

5.2.1 Анализ воздействия объекта на атмосферу

В выбросах двигателей внутреннего сгорания содержатся различные вредные соединения, такие как монооксид углерода CO (угарный газ), углеводородные соединения HC (несгоревшее топливо и масло), оксиды азота NO и NO₂ которые обозначаются NO_x поскольку O постоянно меняется, оксид серы SO₂, соединения свинца, твердые частицы (сажа, копоть). Самым ядовитым компонентом является оксид углерода, содержание которого доходит у неисправных карбюраторных двигателей до 10 %. Нормы выбросов загрязняющих веществ с отработавшими газами определяются в [5].

Применение программного обеспечения для анализа периодических сигналов сложной формы оказывает положительное воздействие на атмосферу. Для уменьшения количества и изменения качественного состава вредных веществ, выбрасываемых в окружающую среду с отработавшими газами, требуется поддержка установленных производителем технических характеристик двигателя, это достигается за счет его регламентного обслуживания и диагностики. Разработанное программное обеспечение позволяет точнее, чем в классических методах обработки вибросигналов, распознавать отклонения в работе двигателя, что в свою очередь дает возможность производить своевременный ремонт.

5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Вследствие неверной работы алгоритма и ошибки в оценке технического состояния ДВС могут произойти следующие ЧС техногенного характера:

- Транспортная авария;
- Пожары и взрывы.

Транспортная авария – опасное техногенное происшествие, возникшее в процессе движения по дороге транспортного средства и с его участием, при котором погибли или ранены люди, повреждены транспортные средства или был нанесен ущерб окружающей среде.

В настоящее время автотранспорт является потенциальной угрозой здоровью и жизни людей. Технический прогресс одновременно со скоростью передвижения и комфортом принес и значительную степень угрозы. В зависимости от вида транспортной аварии возможно получение множественных травм и ожогов, в том числе опасных для жизни человека. Особенность автомобильных аварий состоит в том, что 80% раненых погибает в первые три часа из-за обильных кровопотерь.

В результате дорожно-транспортного происшествия на автомобиле может возникнуть пожар из-за разгерметизации топливной системы и воспламенения топлива от искр механического происхождения, возникающих при ударе. Повреждение систем и узлов автомобиля при ДТП способствует развитию пожара; а заклинивание дверей и травмирование людей препятствует возможности тушения пожара ручными средствами и быстрой эвакуации пострадавших.

При тушении автомобиля нужно быть предельно осторожным, так как может взорваться бак с горючим. По этой же причине нужно удалить от места пожара всех людей, не занятых тушением пожара и оказанием помощи пострадавшим и как можно скорее оповестить пожарную охрану и спасательные службы.

Для предупреждения не правильной работы программы и как следствие возникновения перечисленных ЧС принят ряд мер:

1. Редактирование и отладка программы.
2. Лабораторные эксперименты.

Стоит отметить, что для того чтобы правильно прочитать графики и по ним сделать вывод о возможных неисправностях двигателя нужен квалифицированный персонал, так как для не подготовленного человека график частотно-временной корреляционной функции сложен для понимания.

5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.4.1 Организация рабочего места автомеханика

Рабочее место – часть производственной площади мастерской или цеха с инструментом, оборудованием, материалами и приспособлениями, которые необходимы для выполнения определенного производственного задания.

На рабочих местах автомехаников должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата в соответствии с [2]. Температура воздуха в холодный период года должна быть не более 22-24°C, в теплый период года 20-25°C. Относительная влажность воздуха должна составлять 40-60%, скорость движения воздуха — 0,1 м/с.

В производственных помещениях должно быть искусственное и естественное освещение в соответствии с [4]. Естественное освещение обеспечивается через оконные проемы с коэффициентом естественного освещения КЕО не ниже 1,2% в зонах с устойчивым снежным покровом и не ниже 1,5% на остальной территории.

Организация рабочего места является важнейшим звеном организации труда. Правильный выбор и размещение инструментов, материалов и оборудования создают наиболее благоприятные условия работы.

Правильно организованным считается такое рабочее место, на котором при наименьшей затрате сил и средств благодаря рациональной и культурной

организации труда достигаются наивысшая производительность и высокое качество продукции.

К организации рабочего места предъявляются следующие требования:

1) рабочее место должно быть чистым, на нем должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данного задания;

2) инструменты, заготовки и документация должны располагаться на рабочем месте на расстоянии вытянутой руки; при этом те предметы, которыми рабочий пользуется более часто, следует класть ближе, на площади, ограниченной дугами небольшого радиуса, и наоборот;

3) режущий или ударный инструмент, который берут правой рукой, кладут с правой стороны; тот, который берут левой рукой, - с левой стороны;

4) инструмент, который работающий берет обеими руками, следует располагать ближе к его корпусу, чтобы удобнее было его брать;

5) приспособления, материалы и готовые изделия нужно располагать в различных ящиках на отведенных для них местах, причем более мелкие и часто употребляемые нужно помещать в верхних, а более тяжелые или же редко применяемые - в нижних ящиках;

6) точные и измерительные инструменты должны храниться в специальных футлярах или же деревянных коробках;

7) режущие инструменты (напильники, метчики, сверла, развертки и др.) следует предохранять от ударов и загрязнения, не разбрасывать и не накладывать друг на друга, а укладывать на деревянные подставки (планшеты);

Заключение

В работе реализован способ вычисления частотно временной корреляционной функции. В отличие от классического корреляционного анализа данный метод несет в себе информацию о связи сигналов в частотной области и дает возможность детализировать информацию об общих свойствах двух сигналов.

В результате выполнения работы в программе Mathcad 14.0 реализован алгоритм вычисления частотно-временной корреляционной функции. С помощью данного алгоритма можно определять гармонические составляющие в периодических сигналах с высоким уровнем шума.

Для проверки корректности работы алгоритма были сформированы тестовые примеры, на которых проверена работоспособность разработанного алгоритма и подтверждена достоверность получаемых результатных данных. На основании этого можно сделать выводы, что алгоритм работает верно, и данные полученные на основании его использования корректны.

В ходе работы были изучены принципы диагностики двигателя внутреннего сгорания, которые используются в настоящее время. Существует много различных способов для определения технического состояния двигателя. Одним из перспективных направлений оценки состояния двигателя в процессе эксплуатации является вибродиагностика. Для определения частотно временной корреляционной функции сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания было разработано программное обеспечение в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7.0.

В практической части работы проведено исследование сигналов вибрации двигателя ВАЗ-21013 на примере публикации [8]. В результате по экспериментальным данным была вычислена скорость вращения коленчатого вала. Экспериментальные данные практически совпали с показателями штатного тахометра, небольшую погрешность можно списать на определение частоты вращения по тахометру. Полученный результат можно считать

удовлетворительным, т.к. по результатам эксперимента подтверждена корректность работы программного обеспечения

В работе показана принципиальная возможность использования частотно-временной автокорреляционной функции для анализа периодических сигналов сложной формы.

Применение частотно-временной корреляционной функции при анализе вибросигналов оборудования дает возможность получать показатели и характеристики, которые отражают, техническое состояние машин. Задачу диагностики можно ставить намного шире, анализируя работоспособность и состояние вспомогательных систем двигателя, например, системы впрыска или системы зажигания. Для расширения функциональных возможностей данного метода такие испытания можно проводить для различных режимов работы двигателя внутреннего сгорания.

Применение рассмотренного частотно-временного автокорреляционного метода расширяет область применения математического аппарата корреляционного анализа при исследовании сложных процессов, которые характеризуются сигналами импульсного и полигармонического характера.

Conclusion.

The work is implemented a method for calculating time correlation function of frequency. In contrast to the classical correlation analysis, this method carries information about the communication signals in the frequency domain and provides an opportunity to detail the information on the general properties of the two signals.

As a result of work in Mathcad 14.0 program implemented algorithm for calculating the time-frequency correlation function. With this algorithm it is possible to determine the harmonic components of periodic signals with a high noise level.

To check the correctness of the algorithm have been formed test cases, which test the functionality of the developed algorithm and confirmed the reliability of the results-based data. Based on this, we can conclude that the algorithm is working properly, and the data obtained on the basis of its correct use.

During operation of the engine combustion principles of diagnosis have been studied, which are currently in use. There are many different ways to determine the technical condition of the engine. One of the promising areas of evaluation condition of the engine during operation is vibration diagnostics. To determine the frequency of the time correlation function of the signals of the internal combustion engine vibration was developed software in an integrated environment Borland Delphi 7.0 programming.

In the practical part of the work carried out research engine vibration signals VAZ-21013 on the example of the publication. As a result, the experimental data of the crankshaft rotation speed was calculated. The experimental data practically coincided with the regular performance tachometer, small mono error attributed to the determination of the speed on the tachometer. This result can be considered satisfactory, since the results of the experiment confirmed the correctness of the software.

The paper shows the possibility of using a frequency-time autocorrelation function for the analysis of periodic signals of complex shape.

The use of time-frequency correlation function in the analysis of vibration signals equipment enables the production performance and characteristics that reflect the technical condition of vehicles. The problem diagnosis can be put much broader analysis of the health and status of auxiliary systems of the engine, for example, the injection system or the ignition system. To extend the capability of the method can be carried out such tests for different modes of operation of the internal combustion engine.

Application of the considered time-frequency autocorrelation method extends the scope of the mathematical apparatus of correlation analysis in the study of complex processes, which are characterized by pulse signals and polyharmonic nature.

Список литературы:

1. Аврамчук В.С. Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 5. – С. 113–116.
2. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1989.
3. Матвеев Ю.Н., Симончик К.К., Тропченко А.Ю., Хитров М.В. Цифровая обработка сигналов: Учебное пособие по дисциплине "Цифровая обработка сигналов". - СПб.: СПбНИУ ИТМО, 2013. - 166с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
5. Учебное пособие Слесарь по ремонту автомобилей. «Двигатель внутреннего сгорания» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rtsh.ru/doc/engin_repairs.pdf
6. Гассельберг В. С., Запорожец А. В. Диагностика двигателей внутреннего сгорания автомобилей по виброакустическим параметрам. ISSN 1812-9498. ВЕСТНИК АГТУ. 2007. № 2 (37) с. 72-74
7. Диагностика поршневых компрессоров и двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vibrocenter.ru/vibro04.htm>
8. Аврамчук В.С., Казьмин В.П. Анализ сигналов вибрации двигателя внутреннего сгорания// Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 5. – С. 69–73.
9. Тропченко А.Ю., Тропченко А.А. Цифровая обработка сигналов. Методы предварительной обработки. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 100 с.
10. СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»

11. СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
12. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
13. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.
14. ГОСТ Р 52033-2003. Автомобили с бензиновыми двигателями. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Нормы и методы контроля при оценке технического состояния.
15. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».