

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

**Разработка анализатора спектральных характеристик электрических
сигналов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4071 группы
направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
института физики
Истомина Григория Витальевича

Научный руководитель
Старший преподаватель

Петр 02.06.2026

А.А.Петрунин

подпись, дата

Заведующая кафедрой
радиотехники и электродинамики
д.ф.-м.н., профессор

08/06 02.06.2026

О.Е. Глухова

подпись, дата

Саратов 2026 г.

Введение

Измерение спектральных характеристик является важной составляющей при анализе, обработке и отладке электрических сигналов. Спектральный анализ позволяет разложить сложный сигнал на частотные компоненты, выявить скрытые периодические составляющие, оценить уровень шумов и искажений, что часто является более информативным, чем анализ сигнала только во временной области. Основным математическим аппаратом для решения этих задач выступают дискретное и быстрое преобразования Фурье.

Несмотря на то, что на рынке присутствует множество профессиональных анализаторов спектра, их высокая стоимость делает их недоступными для широкого круга специалистов, студентов технических вузов и радиолюбителей. В связи с этим, разработка доступного, компактного и производительного аппаратно-программного комплекса для спектрального анализа, способного выполнять оцифровку сигнала и построение амплитудно-частотных характеристик в реальном времени, является актуальной научно-технической и практической задачей.

Объектом исследования являются процессы спектрального анализа электрических сигналов и методы их цифрового представления.

Предметом исследования выступают методы и средства аппаратно-программной реализации анализатора спектра на базе специализированного аналого-цифрового преобразователя и современного микроконтроллера.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка и апробация анализатора спектральных характеристик электрических сигналов, обеспечивающего выполнение алгоритмов ДПФ и БПФ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

Изучить теоретические основы спектрального анализа, математический аппарат ДПФ и БПФ, а также природу линейных и нелинейных искажений сигналов.

Обосновать выбор элементной базы, спроектировать и разработать аппаратную часть устройства.

Разработать принципиальную схему, спроектировать топологию и изготовить печатную плату устройства.

Разработать, оптимизировать и отладить программное обеспечение для реализации алгоритмов спектрального анализа с использованием аппаратных ресурсов микроконтроллера.

Провести апробацию и испытания разработанного анализатора спектра на различных типах электрических сигналов.

В работе использованы методы теоретического анализа цифровой обработки сигналов, математического моделирования, схемотехнического проектирования, программирования встраиваемых систем, а также методы натурального экспериментального исследования.

Практическая значимость заключается в создании малогабаритного, быстродействующего и экономически доступного измерительного прибора. Разработанный анализатор спектра может быть успешно использован в образовательном процессе для демонстрации методов цифровой обработки сигналов, в любительской радиоэлектронике, а также для проведения экспресс-анализа сигналов в условиях ограниченного бюджета, выступая полноценной альтернативой дорогостоящим промышленным аналогам.

В работе использованы методы теоретического анализа цифровой обработки сигналов, математического моделирования, схемотехнического проектирования, программирования встраиваемых систем, а также методы натурального экспериментального исследования.

Характеристика материалов исследования: для разработки устройства использовались справочные данные и техническая документация на микроконтроллер ESP32 и аналого-цифровой преобразователь PCM1808

(Texas Instruments), а также программное обеспечение Sprint Layout для проектирования печатной платы и среда разработки Arduino IDE для написания встраиваемого кода. Экспериментальные исследования проводились с использованием генератора сигналов JDS6600, результаты фиксировались в программе PuTTY и обрабатывались средствами математического анализа.

Структура работы включает введение, две главы, заключение, список использованных источников из 20 наименований и приложение с листингом программы. Первая глава посвящена теоретическим основам спектрального анализа сигналов и методам дискретного и быстрого преобразования Фурье. Вторая глава описывает разработку аппаратной части анализатора, выбор компонентов, проектирование и изготовление печатной платы, а также программную реализацию алгоритмов и результаты испытаний.

Основное содержание работы

Глава 1. Спектральный анализ сигналов.

В первом разделе главы рассмотрено понятие сигнала как физического процесса, несущего сообщение [1, 2, 3]. Любой периодический сигнал может быть представлен рядом Фурье, то есть совокупностью простых гармонических составляющих. Приведены математические выражения прямого и обратного непрерывного преобразования Фурье, а также определения амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик сигнала. Модуль спектральной плотности определяет АЧХ сигнала, а её аргумент – ФЧХ, при этом АЧХ является чётной функцией, а ФЧХ – нечётной.

Во втором разделе первой главы проанализированы искажения сигналов, которые подразделяются на линейные и нелинейные [4, 5, 6]. Линейные искажения возникают при отклонении реальных амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик цепи от идеальных и не порождают новых спектральных составляющих. Количественной мерой амплитудно-частотных искажений служит коэффициент частотных искажений, а фазо-частотные искажения характеризуются отклонением группового времени

задержки от постоянной величины. Нелинейные искажения, в отличие от линейных, создают в спектре новые частотные компоненты, отсутствовавшие во входном сигнале, и описываются степенным рядом передаточной функции. Для количественной оценки гармонических искажений введён коэффициент нелинейных искажений КНИ, также были рассмотрены основные источники обоих видов искажений в радиоэлектронных трактах.

В третьем разделе первой главы изложены основы дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [7, 8]. Показано, что ДПФ позволяет перейти от временной последовательности отсчётов к частотному представлению, выдавая для каждой из N частот комплексное число, модуль которого определяет амплитуду, а аргумент – фазу соответствующей гармоники. Приведены формулы прямого и обратного дискретного преобразования Фурье, а также соотношения для вычисления АЧХ и ФЧХ по результатам ДПФ. Рассмотрена связь ДПФ с непрерывным преобразованием Фурье, показаны условия применимости ДПФ (теорема Котельникова, целочисленность периодов сигнала). Обсуждаются такие практические ограничения, как ограниченное разрешение по частоте, погрешности измерения амплитуд из-за эффекта растекания спектра, а также использование весовых окон для ослабления разрывов на границах анализируемого отрезка.

В четвёртом разделе первой главы рассмотрено быстрое преобразование Фурье (БПФ) как более эффективный алгоритм вычисления ДПФ, имеющий линейно-логарифмическую сложность по сравнению с квадратичной для классического ДПФ [9, 10]. Описаны основные области применения БПФ: цифровая обработка звука и видео, обработка изображений, системы связи, сжатие данных. Приведены ключевые свойства преобразования Фурье – линейность, независимость от сдвига (временной сдвиг изменяет только фазовый спектр), растяжение по частоте и симметрия спектра для вещественных сигналов. Изложен основной принцип работы алгоритма БПФ, основанный на рекурсивном разбиении последовательности на чётные и

нечётные подпоследовательности с последующим объединением результатов, что позволяет существенно сократить количество арифметических операций.

Глава 2. Разработка анализатора спектра и апробация.

Первый раздел второй главы посвящён аналого-цифровому преобразованию как ключевому этапу оцифровки сигналов [11, 12, 13]. Рассмотрены теоретические основы работы АЦП: дискретизация по времени и квантование по уровню. Сформулирована теорема Котельникова (Найквиста), согласно которой частота дискретизации должна как минимум вдвое превышать максимальную частоту в спектре сигнала для предотвращения эффекта наложения спектров. Показано, что погрешность квантования определяется шагом квантования и составляет половину его величины. Выявлен компромисс между разрядностью и частотой дискретизации: высокоразрядные АЦП работают медленнее, а быстродействующие имеют меньшую разрядность.

Во втором разделе второй главы обоснован выбор аналого-цифрового преобразователя РСМ1808 компании Texas Instruments [14]. Этот АЦП имеет 24-битное разрешение, максимальную частоту дискретизации 96 кГц и использует дельта-сигма модуляцию с 64-кратной передискретизацией, что обеспечивает высокое отношение сигнал/шум порядка 99 дБ. Описаны особенности микросхемы: встроенный цифровой фильтр высоких частот для подавления постоянной составляющей, отдельное питание аналоговой (5 В) и цифровой (3,3 В) частей. Приведено назначение основных выводов (VCC, DOUT, RLC) и параметры в табличной форме.

В третьем разделе второй главы описан выбор микроконтроллера ESP32 DevKit в 38-контактном исполнении в качестве главного вычислительного и управляющего узла [15]. Микроконтроллер построен на двухъядерном процессоре Tensilica LX6 с тактовой частотой до 240 МГц, оснащён 520 КБ SRAM и 4 МБ SPI Flash. Ключевым преимуществом для данной задачи является наличие аппаратного интерфейса I2S и поддержка прямого доступа к памяти DMA, что позволяет принимать 24-битный аудиопоток с АЦП без

загрузки центрального процессора. Совпадение уровней питания 3,3 В упрощает прямое соединение микросхем. Отмечены также преимущества платы DevKit: встроенный USB-UART мост и стабилизатор напряжения, что облегчает программирование и отладку.

В четвёртом разделе второй главы представлены результаты практической реализации анализатора спектра [16, 17, 18, 19, 20]. Разработана принципиальная схема, в программе Sprint Layout спроектирована печатная плата, изготовленная методом лазерной резки на текстолите с последующим химическим травлением. После устранения ошибок в геометрии отверстий была изготовлена рабочая версия платы. Разработано программное обеспечение в среде Arduino IDE. Первоначальная реализация алгоритма ДПФ на одном ядре ESP32 обрабатывала буфер из 8192 отсчётов за 18 минут, что было неэффективным. После оптимизации – использования второго ядра процессора и уменьшения буфера до 4096 точек – время анализа сократилось до 2 минут. Окончательная версия программы с применением готовой библиотеки быстрого преобразования Фурье (ArduinoFFT) выполнила расчёт спектра за 30 миллисекунд, что подтвердило эффективность БПФ. Проведены испытания на различных сигналах, подаваемых с генератора JDS6600: синусоидальных (частоты 50 Гц, 1 кГц, 5 кГц, 10 кГц, 20 кГц, 40 кГц), треугольных, прямоугольных и CMOS сигналах с амплитудами 0,1 В и 0,5 В. Полученные спектрограммы показали идентичность результатов для ДПФ и БПФ, стабильность работы устройства при изменении амплитуды и корректное отображение гармонического состава для всех типов сигналов. Разработанный анализатор успешно строит амплитудно-частотные характеристики в реальном масштабе времени и может быть использован как доступная альтернатива дорогостоящим промышленным приборам.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель – разработан и испытан анализатор спектральных характеристик электрических сигналов, способный выполнять дискретное и быстрое преобразование Фурье, а также строить амплитудно-частотные характеристики. Решены все сформулированные задачи. Изучены теоретические основы спектрального анализа, включая математический аппарат ДПФ и БПФ, природа линейных и нелинейных искажений сигналов, а также принципы аналого-цифрового преобразования с учётом теоремы Котельникова. Обоснован выбор и спроектирована аппаратная часть на базе АЦП РСМ1808, обеспечивающего 24-битное разрешение и частоту дискретизации до 96 кГц, и микроконтроллера ESP32 с аппаратной поддержкой I2S и DMA. Разработана и изготовлена печатная плата устройства с использованием САПР Sprint Layout, технологии лазерной резки и химического травления. Создано и оптимизировано программное обеспечение: первоначальный алгоритм ДПФ был ускорен за счёт параллельных вычислений на двух ядрах и оптимизации размера буфера, окончательная реализация с применением готовой библиотеки БПФ сократила время расчёта спектра до 30 мс. Проведены испытания на синусоидальных, треугольных, прямоугольных и CMOS сигналах в диапазоне частот от 50 Гц до 40 кГц; сравнительный анализ подтвердил корректность работы алгоритма БПФ и стабильность устройства при изменении амплитуды. Практическая значимость работы заключается в создании малогабаритного, быстродействующего и экономически доступного измерительного прибора, который может быть использован в образовательном процессе, любительской радиоэлектронике, а также для экспресс-анализа сигналов в условиях ограниченного бюджета, являясь полноценной альтернативой дорогостоящим промышленным анализаторам спектра. Дальнейшие перспективы развития устройства связаны с заменой АЦП на более высокопроизводительную модель, расширением частотного диапазона.

Список использованной литературы

1. Бочарова, А. А., Зайко, Н. Ю. Математические основы обработки сигналов [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А. А. Бочарова, Н. Ю. Зайко. – Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – ISBN 978-5-7444-5296-4.
2. Крук, Б. И., Журавлева, О. Б. Основы спектрального анализа : учебное пособие для вузов / Б. И. Крук, О. Б. Журавлева. – М. : Горячая линия–Телеком, 2013. – 148 с.
3. 23-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение» («ЦОС-2021»): доклады. – М. : AUTEX Ltd., 2021. – 262 с. – (Цифровая обработка сигналов и её применение; вып. XXIII). – ISBN 978-5-905278-45-7.
4. Кулагин, А. Е. Методы математической физики. Теория обработки сигналов : практикум / А. Е. Кулагин. – Томск: Типография НТИ, 2026. – 102 с.
5. Кисельников, А. Е. Алгоритмы идентификации типов искажения сигналов с цифровой модуляцией на основе анализа вектора ошибок : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 / А. Е. Кисельников ; науч. рук. А. Л. Приоров. – Ярославль, 2019. – 134 с.
6. Столбов, М. Б. Основы анализа и обработки речевых сигналов : учебное пособие / М. Б. Столбов. – СПб.: НИУ ИТМО, 2021. – 101 с.
7. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс ; пер. с англ. под ред. А. А. Бритова. – 2-е изд. – М. : БИНОМ, 2006. – 652 с.
8. Кандидов, В. П., Чесноков, С. С., Шленов, С. А. Дискретное преобразование Фурье : учебное пособие / В. П. Кандидов, С. С. Чесноков, С. А. Шленов. – М. : Физический факультет МГУ, 2019. – 88 с. – ISBN 978-5-8279-0179-2.
9. Новиков, А. И. Дискретное преобразование Фурье и обработка изображений : учебное пособие / А. И. Новиков. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2022. – 92 с.
10. DSPL-2.0. Свойства преобразования Фурье [Электронный ресурс] / DSPL-2.0 – свободная библиотека алгоритмов цифровой обработки сигналов. –

- Режим доступа:
URL: https://ru.dsplib.org/content/fourier_transform_prop/fourier_transform_prop.html (дата обращения: 20.05.2026). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
11. Бушнев, Д. В., Романов, А. В. Теоретические основы цифровой обработки сигналов : учебное пособие / Д. В. Бушнев, А. В. Романов. – Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2005. – 116 с.
12. Илюхин, А. В., Зарипова, И. И. Устройства цифровой автоматики : учебное пособие : в 2 ч. Ч. 2 / А. В. Илюхин, И. И. Зарипова. – М. : МАДИ, 2020. – 144 с.
13. Капля, Е. В. Аналого-цифровые преобразователи : учебное пособие / Е. В. Капля. – Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2023. – 100 с. – ISBN 978-5-4479-0413-5.
14. Texas Instruments. PCM1808 Single-Ended, Analog-Input 24-Bit, 96-kHz Stereo ADC [Электронный ресурс]: техническое описание / Texas Instruments. – Режим доступа: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/783/DOC059783911.pdf> (дата обращения: 20.05.2026). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
15. Espressif Systems. ESP-WROOM-32 Datasheet [Электронный ресурс]: техническое описание / Espressif Systems. – Режим доступа: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/956/DOC032956630.pdf> (дата обращения: 20.05.2026). – Загл. с экрана. – Яз. англ.
16. Хоровиц, П., Хилл, У. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл ; пер. с англ. Б. Н. Бронина [и др.]. – Изд. 7-е. – М. : БИНОМ, 2019. – 704 с.
17. ГОСТ Р 53429-2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. – М. : Стандартинформ, 2018. – 7 с.
18. Князев, А. А. Sprint-Layout. Руководство пользователя [Электронный ресурс] / А. А. Князев. – Режим доступа: URL: https://схеми.ru/_fr/90/Sprint-Layout-.pdf (дата обращения: 28.05.2026). – Загл. с экрана. – Яз. рус.
19. Монк, С. Програмируем Arduino : основы работы со скетчами / С. Монк. – СПб.: Питер, 2016. – 176 с.

20. Гимпилевич, Ю. Б. Сигналы и процессы в радиоэлектронике : учебное пособие / Ю. Б. Гимпилевич. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 247 с.