

УДК 621.317.75:004.31

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО АНАЛИЗАТОРА СПЕКТРА

И.С. БЕЛЫЙ, В.А. НАГОРНЫЙ

*Южный Федеральный Университет  
(г. Ростов-на-Дону-Таганрог, Россия)*

*E-mail: ibelyi@sfedu.ru, nagornyi@sfedu.ru*

**Аннотация.** В данной работе рассматривается возможность создания цифрового анализатора спектра с использованием микроконтроллерной платформы *Raspberry Pi Pico*. Рассматриваются основные принципы функционирования анализатора спектра, а также особенности его программно-аппаратной реализации. Показано, что применение данной платформы позволяет разработать недорогой и достаточно функциональный прибор, который может использоваться в учебных целях, при проведении лабораторных исследований и в радиоловительской практике.

**Abstract.** This paper examines the possibility of developing a digital spectrum analyzer based on the *Raspberry Pi Pico* microcontroller platform. The fundamental operating principles of a spectrum analyzer, as well as the features of its hardware and software implementation, are discussed. It is shown that the use of this platform makes it possible to create an inexpensive and sufficiently functional device suitable for educational purposes, laboratory research, and amateur radio applications.

### Введение

Анализатор спектра представляет собой электронное устройство, предназначенное для изучения частотных характеристик электрических сигналов. С его помощью можно определить состав спектра сигнала, а также оценить амплитуды отдельных частотных компонентов. Современные промышленные анализаторы спектра относятся к категории сложных высокоточных измерительных приборов, стоимость которых может достигать значительных величин. Это связано с использованием высококачественных аналоговых трактов, высокой скоростью обработки данных, широким диапазоном рабочих частот и специализированным программным обеспечением. По этой причине подобное оборудование часто оказывается малодоступным для учебных организаций, радиоловителей и индивидуальных разработчиков. В настоящее время развитие микроконтроллерной техники позволяет выполнять базовые задачи спектрального анализа с использованием недорогих вычислительных платформ. Одним из таких решений является микроконтроллер *RP2040*, применяемый в плате *Raspberry Pi Pico*. В данной работе рассматриваются особенности построения анализатора спектра на основе этой платформы, его структура и основные принципы функционирования.

### Структурная схема устройства и описание работы

На рисунке 1 приведена структурная схема устройства. В состав устройства входят следующие функциональные узлы:

- входной аналоговый тракт;
- аналоговый коммутатор *TS5A23157*;
- синтезатор частоты *SI5351*;
- формирователь управляющих сигналов на *SN74LVC74A*;
- квадратурный преобразователь частоты на *FST3253*;
- фильтры нижних частот на *NE5532P*;
- преобразователь питания *ICL7660S*;
- микроконтроллерная плата *Raspberry Pi Pico*.

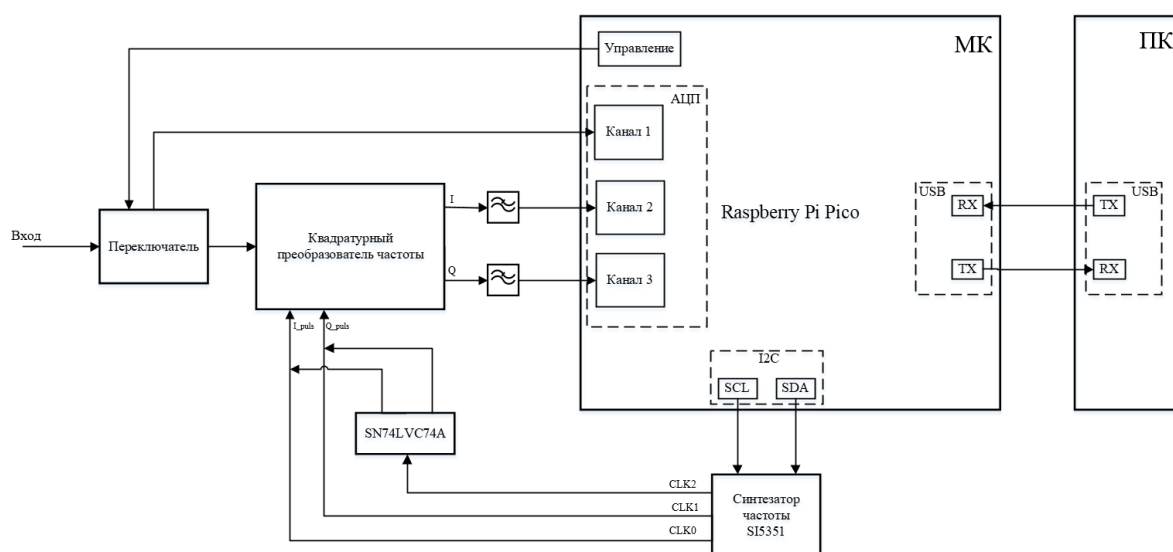


Рис. 1. Структурная схема анализатора спектра

Работа устройства начинается с подачи исследуемого аналогового сигнала на входной разъём. Далее сигнал поступает во входной тракт, где выполняется его предварительная подготовка. На этом этапе может осуществляться развязка по постоянной составляющей, ограничение амплитуды и согласование уровня сигнала с последующими узлами схемы.

После входного тракта сигнал поступает на аналоговый коммутатор *TS5A23157*. Данный узел используется для выбора пути прохождения сигнала. Если анализируемый сигнал находится в низкочастотной области и может быть непосредственно оцифрован встроенным АЦП микроконтроллера, он может быть направлен в тракт прямой оцифровки. Если же частота сигнала превышает возможности прямой оцифровки, сигнал направляется в тракт понижающего квадратурного преобразования.

В режиме понижающего преобразования сигнал поступает на ключевой квадратурный преобразователь частоты, реализованный на *FST3253*. Эта микросхема выполняет роль управляемого аналогового ключа. Переключение её каналов происходит под действием цифровых управляющих сигналов, формируемых на основе сигнала гетеродина. В результате входной сигнал периодически коммутируется таким образом, что на выходе преобразователя образуются две низкочастотные составляющие: *I* и *Q*.

Частота преобразования задаётся синтезатором *SI5351*. Микроконтроллер *Raspberry Pi Pico* по интерфейсу *I2C* передаёт в *SI5351* настройки требуемой частоты. Синтезатор формирует тактовый сигнал, который далее поступает на логическую микросхему *SN74LVC74A*. Использование триггеров позволяет получить управляющие сигналы с более низкой частотой для работы квадратурного преобразователя от 1 до 6 МГц.

Именно эта составляющая используется для дальнейшей оцифровки и анализа. Например, если на вход поступает сигнал с частотой 550 кГц, а частота гетеродина установлена равной 500 кГц, то после преобразования полезная составляющая будет находиться на частоте 50 кГц. Такой сигнал уже может быть корректно обработан встроенным АЦП микроконтроллера.

На выходе *FST3253* присутствуют не только полезные низкочастотные составляющие, но и высокочастотные продукты коммутации. Поэтому после квадратурного преобразователя устанавливаются фильтры нижних частот. Фильтры подавляют суммарную частотную составляющую, остатки сигнала гетеродина и коммутационные выбросы, оставляя только полезную полосу сигнала.

Так как устройство формирует два квадратурных канала, фильтры нижних частот выполняются отдельно для канала *I* и канала *Q*. При этом параметры обоих фильтров должны быть одинаковыми. Это необходимо для сохранения баланса амплитуд и фаз между синфазной и квадратурной составляющими. Нарушение симметрии каналов может привести к искажению спектра при дальнейшей цифровой обработке.

Для корректной работы операционных усилителей используется двухполярное питание. Положительное напряжение питания поступает от общей системы питания устройства, а отрицательное формируется с помощью преобразователя *ICL7660S*. Такое решение позволяет питать аналоговые каскады

от положительного и отрицательного напряжений, что упрощает обработку переменных сигналов и повышает удобство построения активных фильтров.

После фильтрации сигналы  $I$  и  $Q$  поступают на входы АЦП *Raspberry Pi Pico*. Микроконтроллер выполняет оцифровку двух каналов, формирует поток цифровых отсчетов и передает данные на персональный компьютер через *USB*. На стороне ПК выполняется дальнейшая цифровая обработка. [1-4]

### Описание программной части

Алгоритм передачи данных с микроконтроллера в ПК был взят из проекта «Реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов на основе платы *Raspberry Pi Pico*». [5]

Для разработки программного обеспечения был выбран язык программирования *Python*. [6]

В ходе разработки использовались библиотеки:

*NumPy*;

*SciPy*;

*Matplotlib*.

Программное обеспечение состоит из двух основных частей:

модуля спектрального анализа;

графического интерфейса пользователя.

Модуль анализа выполняет:

- 1) прием буфера данных;
- 2) вычисление спектра;
- 3) усреднение спектральных оценок;
- 4) вычисление мощности сигнала.

Графический интерфейс обеспечивает:

- 1) отображение спектра;
- 2) отображение водопада спектра;
- 3) управление параметрами анализа;
- 4) выбор метода обработки.

При обработке квадратурных сигналов возможно возникновение временного рассогласования между каналами  $I$  и  $Q$ . Для компенсации дробной задержки использовалась интерполяция на основе фильтра Фэрроу. [7]

Кубическая интерполяция позволяет восстанавливать промежуточные значения сигнала и выполнять временной сдвиг на дробную величину периода дискретизации.

Применение фильтра Фэрроу обеспечивает:

- 1) выравнивание  $I/Q$  каналов;
- 2) уменьшение фазовой ошибки;
- 3) улучшение подавления зеркального канала;
- 4) повышение точности спектрального анализа.

Реализованы 2 режима работы:

- 1) Режим «Стробоскоп», при котором задействован только один канал АЦП микроконтроллера;
- 2) Режим «Гетеродин», при котором осуществляется преобразование частоты с помощью квадратурного преобразователя частоты и задействованы 2 канала АЦП микроконтроллера.

Режим «Стробоскоп» предназначен для анализа сигналов до 1 МГц в различных зонах Найквиста.

При работе в данном режиме:

- 1) выполняется отображение спектра сигнала;
- 2) поддерживается выбор зоны Найквиста;
- 3) реализуется перестройка частотной шкалы.

Стробоскопический режим позволяет анализировать сигналы с частотами выше половины частоты дискретизации.

Режим «Гетеродин» реализует перенос спектра относительно частоты локального генератора *SI5351*.

В данном режиме:

- 1) отображается спектр относительно частоты гетеродина  $f_{LO}$ ;
- 2) используется комплексное представление сигнала;
- 3) поддерживается отображение полосы  $\pm 100$  кГц.

Режим гетеродина позволяет исследовать узкополосные сигналы в выбранном диапазоне частот.

В программном обеспечении реализованы два метода анализа: БПФ и метод Уэлча.

Пользователь может выбрать необходимый метод анализа с помощью элементов графического интерфейса. Основным является метод спектрального анализа Уэлча. Также для уменьшения флуктуаций спектра реализовано экспоненциальное усреднение спектральной плотности мощности.

Метод Уэлча применяется для оценки спектральной плотности мощности сигнала.

Суть метода заключается в разделении сигнала на несколько перекрывающихся сегментов, вычислении спектра для каждого сегмента и последующем усреднении результатов. [8]

Использование метода Уэлча позволяет:

уменьшить дисперсию спектральной оценки;

снизить влияние шумов;

получить более сглаженный спектр.

В программном обеспечении анализатора метод Уэлча реализован совместно с возможностью выбора оконной функции.

Графический интерфейс, реализованный с использованием библиотеки *Matplotlib*, приведен на рисунке 2.

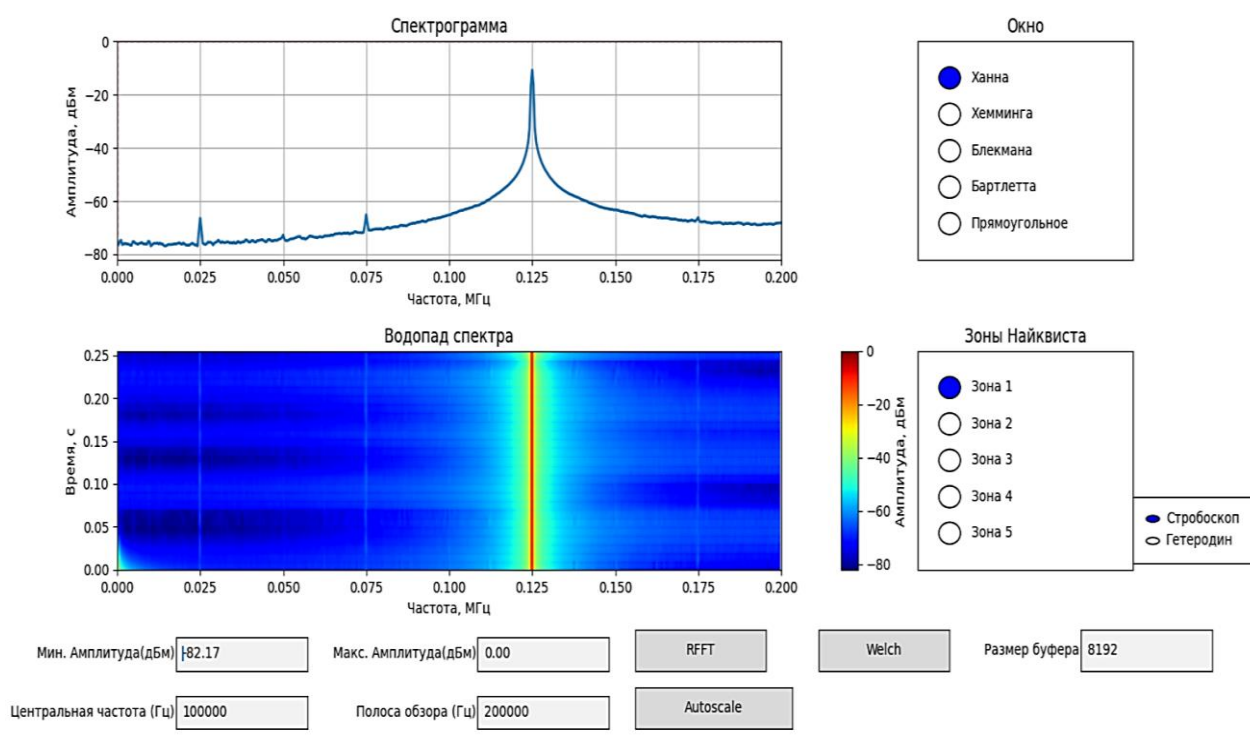


Рис. 2. Графический интерфейс анализатора спектра

Интерфейс включает:

- 1) график спектра;
- 2) водопад спектра;
- 3) элементы управления;
- 4) автоматическое масштабирование.

Пользователь может:

- 1) изменять размер буфера;
- 2) выбирать оконную функцию;
- 3) переключать методы анализа;
- 4) задавать параметры отображения;
- 5) изменять режим работы анализатора.

### Экспериментальные исследования

В ходе экспериментов выполнялся анализ гармонических сигналов различной частоты. Результаты приведены на рисунках 3 – 8.

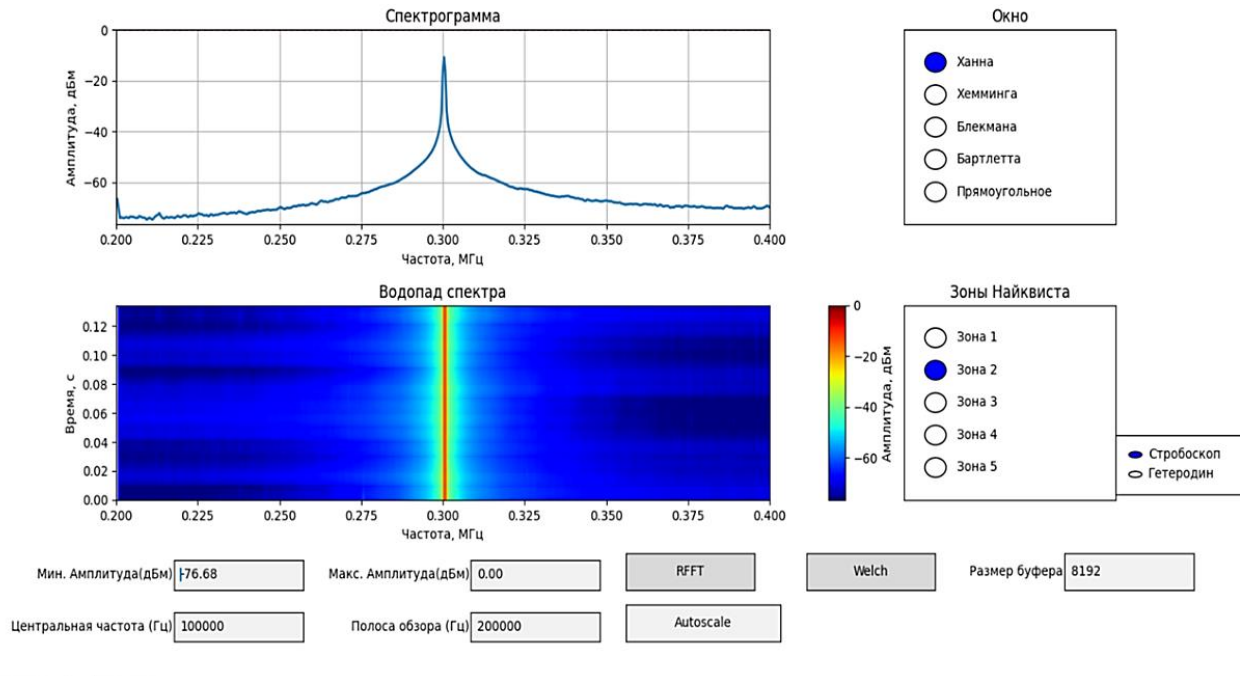


Рис. 3. Спектр синусоиды с частотой 300 кГц

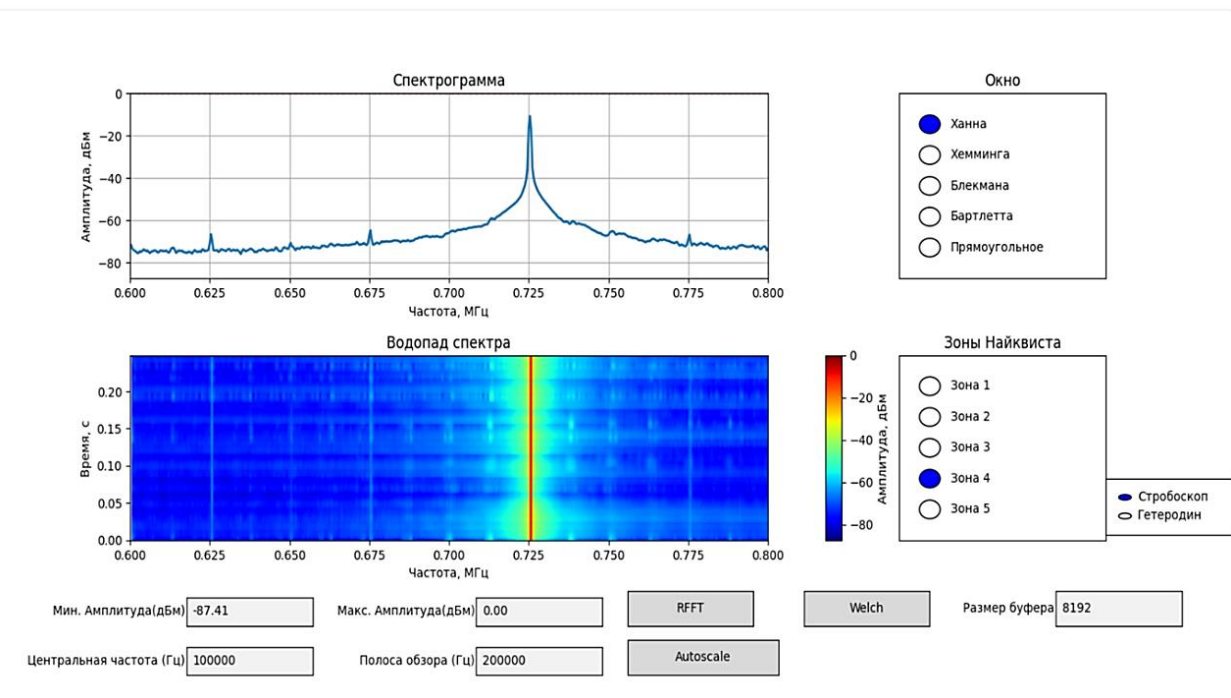
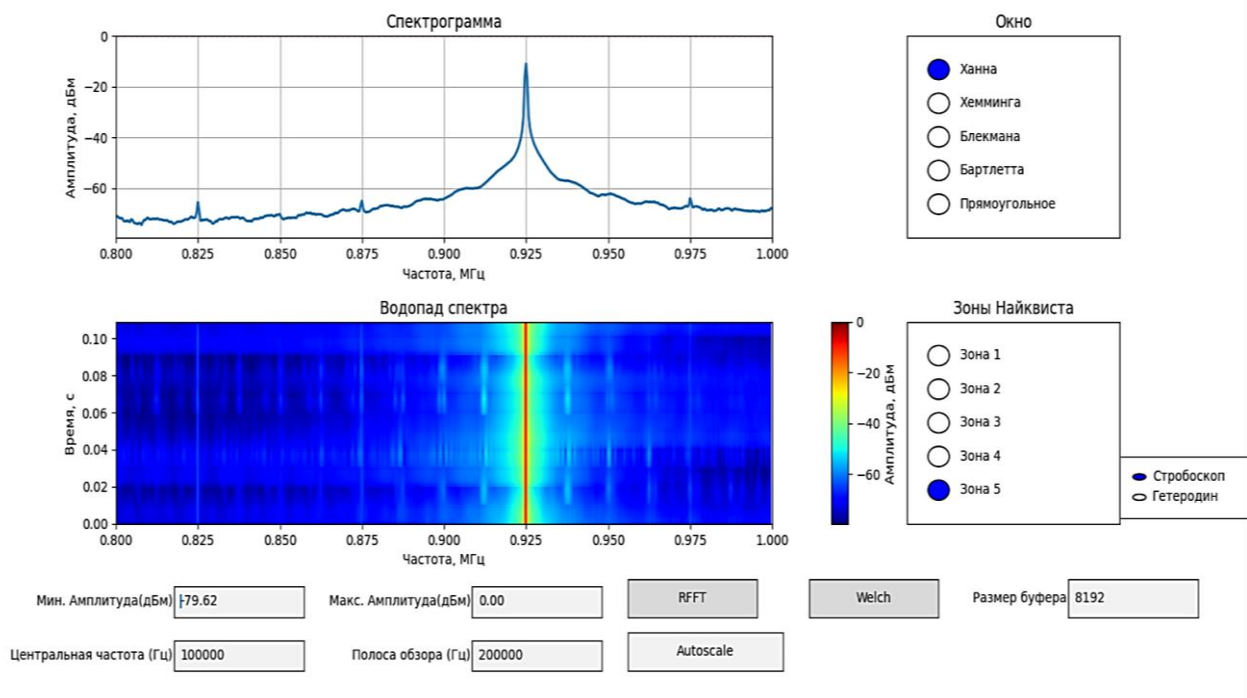
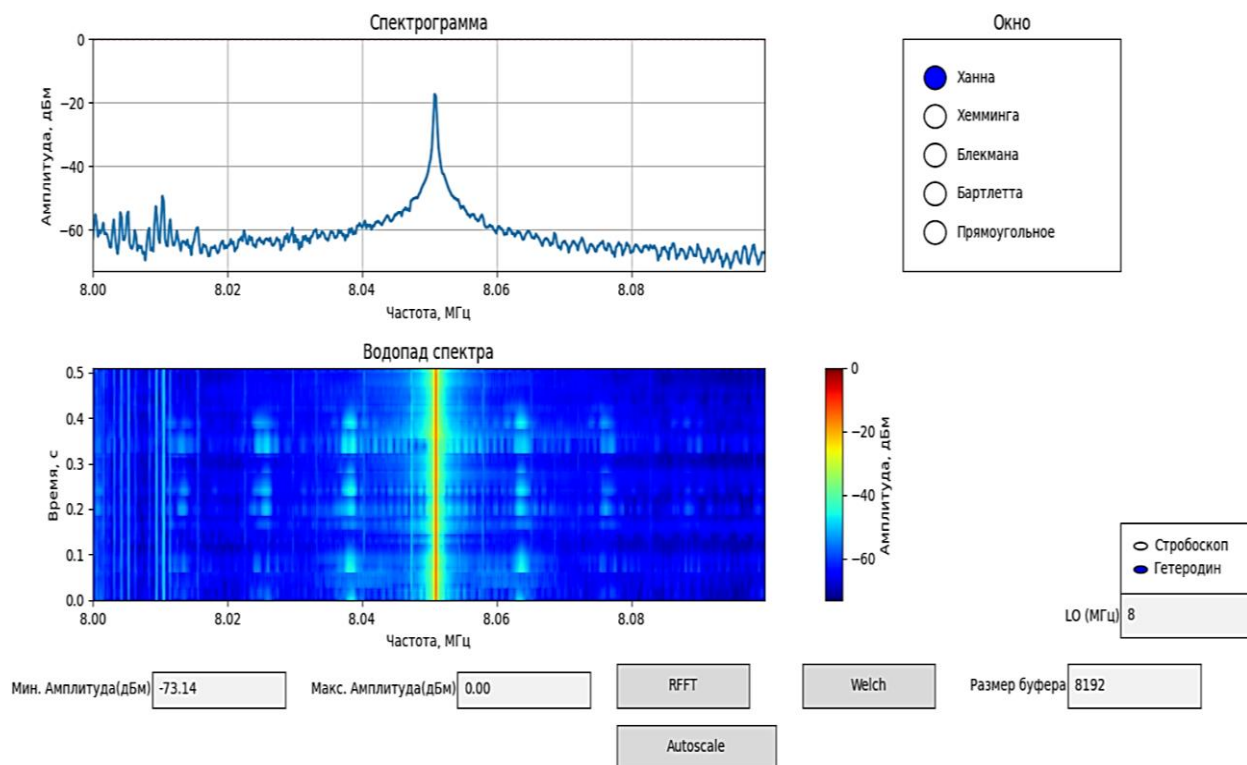


Рис. 4. Спектр синусоиды с частотой 725 кГц



**Рис. 5.** Спектр синусоиды с частотой 925 кГц



**Рис. 6.** Спектр синусоиды с частотой 8,05 МГц

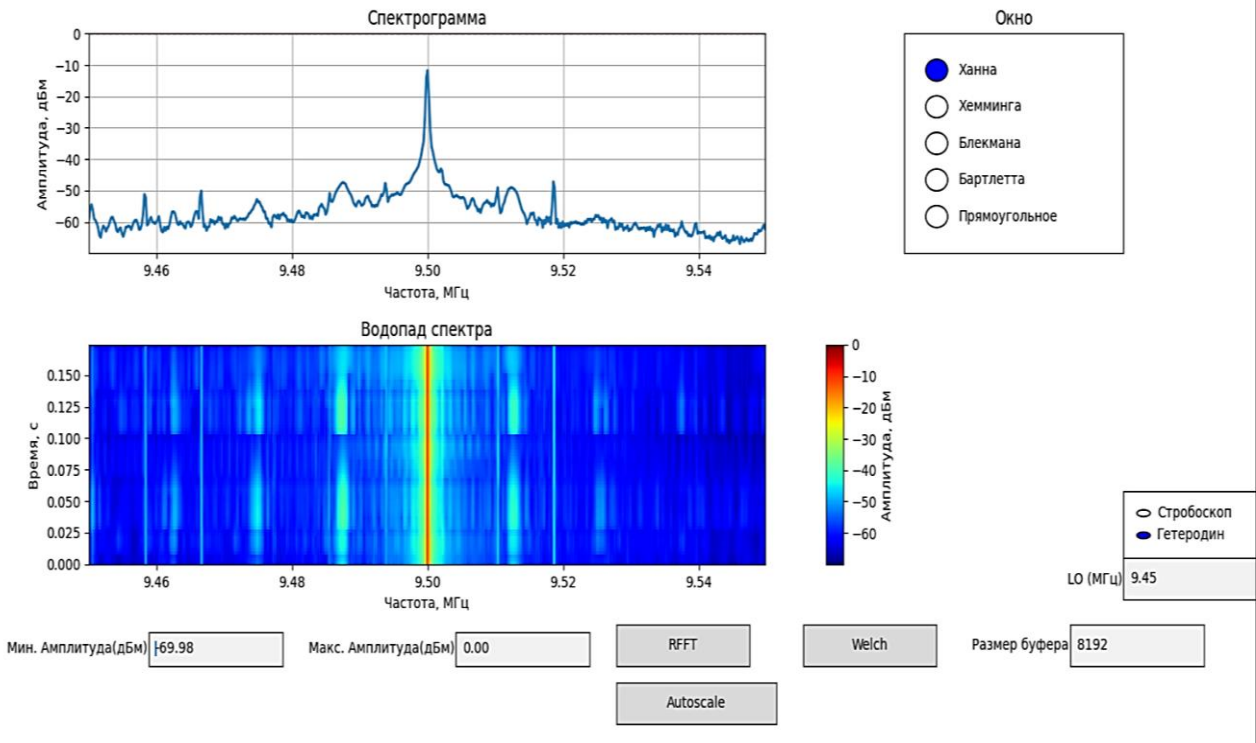


Рис. 7. Спектр синусоиды с частотой 9,5 МГц

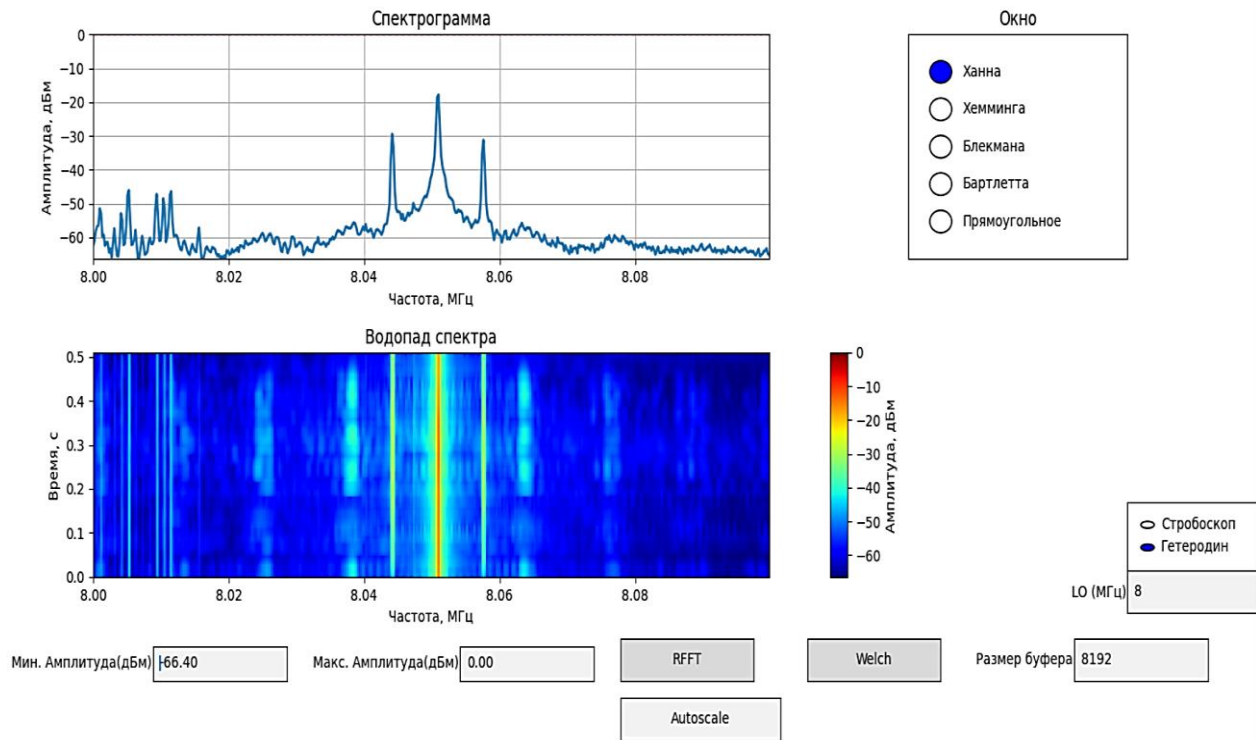


Рис. 8. Спектр АМК (несущая частота 8,051 МГц, модулирующая – 5 кГц)

Программное обеспечение успешно обеспечивает:

Секция 1 «Радиотехника, антенны и устройства СВЧ»

## «ИНФОРМАЦИОННЫЕ РАДИОСИСТЕМЫ И РАДИОТЕХНОЛОГИИ 2026»

Международная научно-техническая конференция, 9-10 июня 2026 г., Минск, Республика Беларусь

- 1) отображение спектра в реальном времени;
- 2) построение водопада спектра;
- 3) динамическое изменение параметров анализа;
- 4) переключение между режимами обработки.

Экспериментальные результаты подтвердили работоспособность разработанного программно-аппаратного комплекса.

В режиме «Гетеродин» в начальной области спектра наблюдаются выраженные паразитные составляющие, обусловленные побочными продуктами синтезатора частоты  $SI5355$ . Для уменьшения влияния данных артефактов в дальнейшем планируется реализация алгоритма калибровки и компенсации спектральных искажений

Технические характеристики:

Диапазон рабочих частот: 300 Гц...100 МГц;

Полоса обзора: 200 кГц;

Разрешающая способность: 300 Гц.

### Заключение

В данной работе был разработан программно-аппаратный анализатор спектра на основе платы *Raspberry Pi Pico*. Реализованная система способна эффективно анализировать сигнал в реальном времени, обеспечивая визуализацию спектра. Аппаратная часть построена на базе доступного микроконтроллера и минимального числа компонентов, что позволяет обеспечить низкую себестоимость устройства. Разработанный анализатор спектра может быть использован для учебных экспериментов, отладки радиотехнических схем, а также в качестве компактного и доступного инструмента для измерений в лабораторных условиях. В дальнейшем планируется добавить алгоритм калибровки и зарегистрировать программное обеспечение в качестве программы для ЭВМ.

### Список использованных источников

1. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов М.: Радио и связь, 1986
2. Цветков Ф.А., Терешков В.В. Комплексные сигналы в радиотехнических устройствах передачи и приема информации: учебное пособие. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015
3. Хоровиц, П. Искусство схемотехники: в 3 т. / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Мир, 1993.
4. *Taylor, D. Ultra Low Noise, High Performance, Zero IF Quadrature Product Detector and Preamplifier* [Электронный ресурс] / D. Taylor. — [Б. м.]: [б. и.], [б. г.]. — 12 p.
5. Проект «Реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов на основе платы *Raspberry Pi Pico*» [Электронный доступ] <https://gitflic.ru/project/aamaryev/rpi-pico-for-dsp> (дата обращения 05.03.2026 г.)
6. М. Доусон, Программирование на *Python* для начинающих, Москва: БХВ-Петербург, 2018.
7. Раушер К., Йанесен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа/ Пер. с англ. С. М. Смольского; под редакцией Ю. А. Гребенко – 4-е изд., испр. – М.: Навигатор, 2021. – 226 с.: ил.
8. Маркович И.И. Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах – Ростов н/Д: Издательство ЮФУ, 2012.