

## ПОСТРОЕНИЕ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛИРУЕМОГО СИГНАЛА

*Понкратов А.М.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Ролл О.Ч. – канд. техн. наук*

**Аннотация.** Основная задача данной работы состоит в проведении спектрального анализа математически моделируемого сигнала и построении его амплитудно-частотной характеристики. Спектральный анализ производится с использованием вычислительной мощности микроконтроллера STMicroelectronics STM32F103C4.

**Ключевые слова:** микроконтроллер, спектральный анализ, сигнал, амплитуда, частота, фаза, преобразование Фурье.

**Введение.** Спектр сигнала – основная характеристика сигнала в частотной области. Знание этой характеристики позволяет определить диапазон частот, занимаемый сигналом, и применять принцип суперпозиции для анализа линейных систем. Выявление повышенных амплитуд вибрации на частотах, совпадающих с частотами возможных повреждений элементов, резонансных частотах деталей, на частотах протекания рабочего процесса помогает обнаружить и идентифицировать неисправность на ранних стадиях зарождения и развития.

Задача реализуется на языке программирования C, в качестве операционной системы используется встраиваемая операционная система FreeRTOS. Развёртывание операционной системы производится на микроконтроллере STMicroelectronics STM32F103C4, амплитудно-частотная характеристика строится на бинарном дисплее AMPIRE 128x64. Демонстрация работы программы осуществляется в системе автоматизированного проектирования Proteus.

**Основная часть.** Спектральный анализ – это метод обработки сигналов, позволяющий охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. К задачам спектрального анализа относятся:

- спектральное разложение сигнала – представление сигнала в виде суммы гармонических сигналов с различными частотами;
- анализ спектральных компонент с целью изучения свойств сигнала;
- обратное преобразование – получение сигнала по известному спектральному разложению.

Спектральный анализ широко используется в различных отраслях промышленности и науки, и служит универсальным инструментом, который позволяет точно и оперативно исследовать элементный состав вещества. Эта информация необходима для правильного ведения технологических процессов, контроля качества исходных материалов, промежуточного и готового продуктов, а также позволяет создавать новые материалы с заданными качествами.

Математическую основу спектрального анализа составляет преобразование Фурье, связывающее временное и частотное представления сигналов. Преобразование Фурье позволяет представить практически любую функцию или набор данных в виде комбинации таких тригонометрических функций, как синус и косинус, что позволяет выявить периодические компоненты в данных и оценить их вклад в структуру исходных данных или форму функции. Традиционно различаются три основные формы преобразования Фурье: интегральное преобразование Фурье, ряды Фурье и дискретное преобразование Фурье.

Наибольший интерес для систем цифровой обработки сигналов представляет дискретное преобразование Фурье. Данные, получаемые с цифровых носителей или источников ин-

формации, представляют собой упорядоченные наборы чисел, записанные в виде векторов или матриц.

Простейший способ вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ) - прямое суммирование, оно приводит к  $N$  операциям на каждый коэффициент. Всего коэффициентов  $N$ , так что общая сложность  $O(N^2)$ . Такой подход не представляет практического интереса, так как существуют гораздо более эффективные способы вычисления ДПФ, называемые быстрым преобразованием Фурье (БПФ), имеющее сложность  $O(N \log N)$ . БПФ применяется только к последовательностям, имеющим длину (число элементов), кратную степени 2. Наиболее общий принцип, заложенный в алгоритм БПФ, заключается в разбиении входной последовательности на две последовательности половинной длины. Первая последовательность заполняется данными с четными номерами, а вторая - с нечетными. Это дает возможность вычисления коэффициентов ДПФ через два преобразования размерностью  $N/2$ .

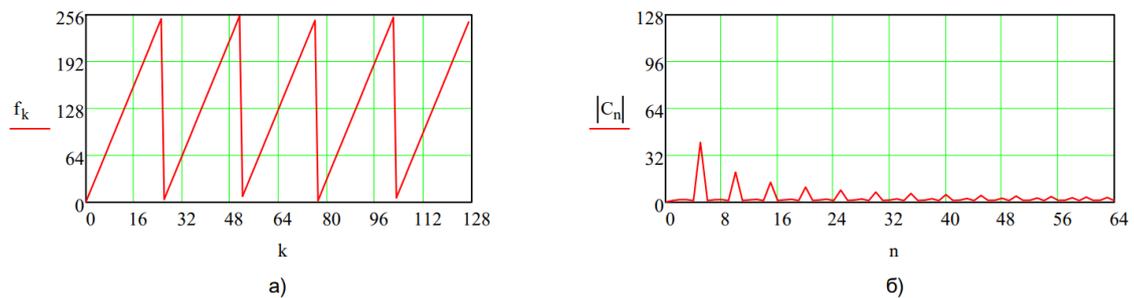


Рисунок 1 – График исходной функции (а) и её фурье-образ (б)

Для математического моделирования сигнала была выбрана функция

$$\begin{aligned} signal_k = & 0.75 * \cos\left(\left(\frac{2\pi}{N}\right) * 5 * \left(k + \frac{N}{8}\right)\right) + 0.5 * \cos\left(\left(\frac{2\pi}{N}\right) * 3 * \left(k - \frac{N}{4}\right)\right) - 1.5 * \\ & \sin\left(\left(\frac{2\pi}{N}\right) * 2 * \left(k + \frac{N}{8}\right)\right) + 0.5 * \sin\left(\left(\frac{2\pi}{N}\right) * 7 * \left(k + \frac{N}{4}\right)\right), \end{aligned}$$

где  $\pi = 3.1415926$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$ ,  $N = 16$ .

Так как операционная система FreeRTOS подразумевает разбиение программы на подзадачи, разобьём индивидуальное задание на две части: в первой части задания будет выполняться быстрое преобразование Фурье исходного сигнала, во второй – построение его амплитудно-частотной характеристики. Для выполнения БПФ использована библиотека “ArmMath”.

После выполнения быстрого преобразования Фурье мы имеем новый массив значений: действительные и мнимые части чередуются, по этой причине он больше исходного по размеру в 2 раза. Действительная составляющая представляет собой массив, содержащий значения косинусоидальных составляющих, а мнимая составляющая представляет собой массив, содержащий значения синусоидальных составляющих.

Второй задачей будет построение амплитудно-частотной характеристики.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)  $A(\omega)$  есть зависимость отношения амплитуды колебаний на выходе звена к амплитуде на входе от частоты входного сигнала. АЧХ выражает отношение амплитуд колебаний на выходе звена и его входе в зависимости от частоты входного сигнала. Формула построения АЧХ:

$$A(\omega) = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)} \quad (1)$$

Результаты вычисления амплитуд хранятся в новом массиве данных. Для построения АЧХ на дисплее используется отдельная функция, которая рассчитывает амплитуду по формуле (1).

Реализованную функцию вывода на дисплей можно также использовать для построения функции исходного сигнала и фазово-частотной характеристики.

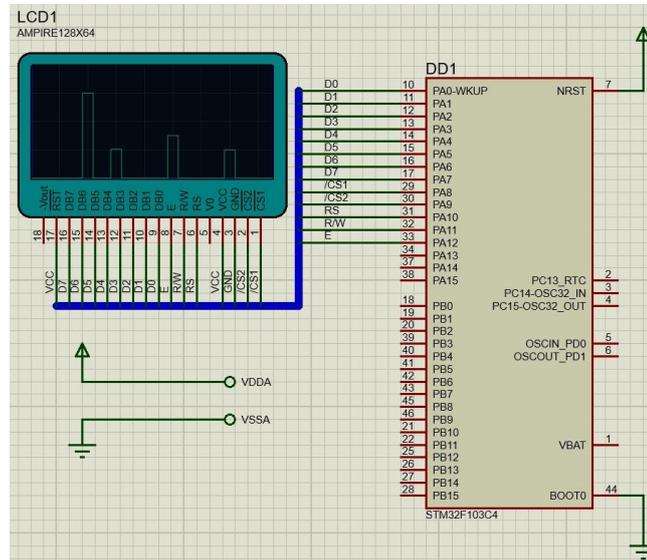


Рисунок 2 – Результат построения АЧХ исходного сигнала

**Заключение.** При выполнении данной научной работы были изучены математический аппарат спектрального анализа, дискретное и быстрое преобразование Фурье. Результатом работы служит амплитудно-частотная характеристика математически моделируемого сигнала, построенная на дисплее Ampire 128x64 с помощью вычислительной мощности микроконтроллера STMicroelectronics STM32F103C4.

### Список литературы

1. CMSIS DSP Software Library [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа: <https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/DSP/html/index.html>.
2. STM32F103xx family datasheet [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c4.pdf>.
3. Преобразование Фурье. Линейная фильтрация в частотной области [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: [wiki.technicalvision.ru](http://wiki.technicalvision.ru).

UDC 004.67

## PLOTTING THE FREQUENCY RESPONSE OF A MATHEMATICALLY MODELED SIGNAL

Ponkratov A.M.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Rolich O.Ch. – PhD, Associate professor

**Annotation.** The main purpose of this work is to perform a spectral analysis of a mathematically modeled signal and plot its frequency response. Spectral analysis is completed using the computing power of STMicroelectronics STM32F103C4 microcontroller.

**Keywords.** microcontroller, spectral analysis, signal, amplitude, signal frequency, phase, Fourier transform.