

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Ижевский Государственный Технический Университет имени М.Т.Калашникова»
Кафедра «ВТ»

ОТЧЕТ
по лабораторной работе
на тему «Разработка спектроанализатора»
по курсу «Процессоры обработки сигналов»
Листов 20

Выполнил
студент гр.М03-781-1
Проверил
преподаватель кафедры «ВТ»

В.В.Симаков

К.А. Никитин

Ижевск 2014

СОДЕРЖАНИЕ

Исходное задание.....	3
1. Аппаратное обеспечение.....	4
1.1. Подбор элементной базы	4
1.2. Функциональная схема	5
1.3. Принципиальная схема	5
1.4. Расчет параметров схемы	7
1.5. Моделирование схемы в Micro-Cap.....	9
2. Программное обеспечение.....	11
2.1. Разработка алгоритма	11
2.2. Описание логической структуры	13
2.2.1. Модуль работы с периферией.....	14
2.2.2. Модуль математических расчетов.....	16
2.2.3. Модуль работы с дисплеем	17
2.3. Синтез цифрового фильтра в MATLAB.....	17
3. Симуляция в ISIS Proteus.....	19
Заключение.....	20

ИСХОДНОЕ ЗАДАНИЕ

Необходимо разработать спектроанализатор, удовлетворяющий требованиям приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Требования, предъявляемые к спектроанализатору

Параметр	Значение
Входной сигнал	пилообразный
Максимальная амплитуда	5 В
Максимальная частота	20 кГц
Элементная база	биполярная
Питание	± 5 В
Визуализация спектра	на дисплее, шаг 2 кГц

1. АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

1.1. Подбор элементной базы

В качестве основного вычислителя для спектроанализатора выбран процессор цифровой обработки сигналов от Texas Instruments Tms320f28022da. Основные параметры микроконтроллера приведены в таблице 2. Особенностью данной линейки процессоров является их специализация на обработке сигналов, умеренная стоимость, отличная производительность. Среди моделей своего семейства данный процессор обладает повышенным объемом памяти, работает на частоте 50 МГц и является наиболее выгодным по критерию цена/производительность.

Таблица 2 – Основные параметры Tms320f28022da

№ п/п	Параметр		Значение
1	Flash память (16битных слов)		16К
2	Наличие загрузочной памяти		Да
3	Оперативная память (16битных слов)		6К
4	Частота		50 МГц
5	12-битный АЦП	Частота выборок	3 000 000 выб/с
		Время преобразования	260 нс
		Количество каналов	7
6	32-битные таймеры, шт.		3
7	Ном. питание, В		3,3 В

Выбор микроконтроллера в дальнейшем определяет остальные компоненты схемы. Поскольку номинальное питание МК 3,3 В, а согласно исходному заданию питание биполярное величиной 5 В, то необходимы преобразователи напряжения. В качестве таких преобразователей выбраны ИМС LM317К для положительного питания и LM337К для отрицательного питания. Данные преобразователи зарекомендовали себя в среде радиолюбителей, поскольку надежны, недороги и позволяют легко и гибко настраивать выходное напряжение.

Для усиления/ослабления сигнала выбран ОУ AD8027AR от Analog Devices. Особенностью данного усилителя является его быстродействие, низкие шумы, Rail-to-Rail выходная характеристика, когда выходное напряжение приближается к напряжению питания. AD8027AR

рекомендуется производителем к использованию в измерительных приборах. Кроме того питание данного ОУ биполярное и имеет диапазон от 2,7 до 12 В, что идеально подходит для требуемых в техническом задании параметров.

1.2. Функциональная схема

Функциональная схема спектроанализатора представлена на рисунке 1. На рисунке АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер.



Рисунок 1 – Функциональная схема спектроанализатора

На вход поступает аналоговый сигнал с амплитудой 5 В согласно исходному заданию, который с помощью промежуточного преобразователя ослабляется и сдвигается в область положительных напряжений. Ослабление сигнала выполняется для возможности далее подать сигнал на АЦП, поскольку входной сигнал по амплитуде больше, чем допустимый на входе АЦП. Сдвиг сигнала в положительную область необходим, поскольку АЦП на Tms320f28022da работает только с положительным напряжением. После промежуточного преобразователя сигнал поступает на аналоговый фильтр для устранения нежелательных гармоник вне полосы пропускания. По окончании аналоговой обработки сигнала он поступает на АЦП микроконтроллера для выполнения цифровой обработки. МК выполняет фильтрацию сигнала с помощью цифрового КИХ-фильтра и выполняет БПФ, результаты которого визуализируются на дисплее.

1.3. Принципиальная схема

Отталкиваясь от функциональной схемы промежуточный преобразователь реализуется на базе не инвертирующего сумматора, который выполняет одновременно ослабление и сдвиг сигнала в область положительных частот.

Аналоговый фильтр выполняется по структуре Салена-Ки, поскольку данный тип фильтра обладает хорошими показателями ослабления сигнала в полосе затухания со спадом 40 дБ/дек при относительно несложном расчете. Для обеспечения равномерной АЧХ в полосе пропускания выбрана характеристика Баттерворта, для этого должен обеспечиваться коэффициент усиления равный 1,6.

Конечная принципиальная схема спектроанализатора представлена на рисунке 2.

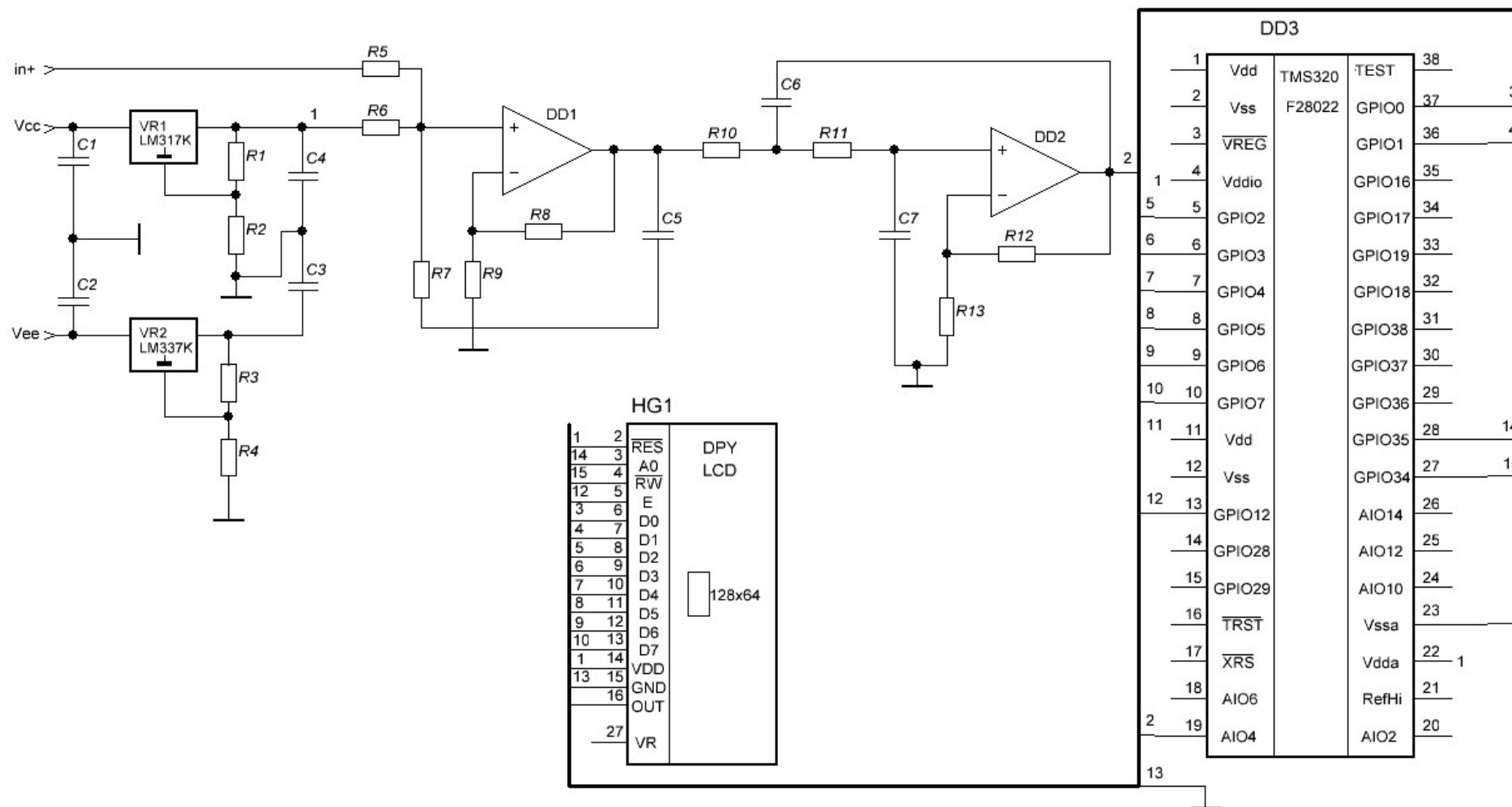


Рисунок 2 – Принципиальная схема спектроанализатора

1.4. Расчет параметров схемы

Стабилизация напряжения на входе выполнена по типовой схеме включения, приведенной в документации на LM317 и LM337. В данной схеме включения фильтрующие конденсаторы C1 и C2 выбираются равными 0,1 мкФ.

Напряжение на выходе LM317 согласно документации определяется по формуле:

$$U_o = U_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} R_2, \quad (1)$$

где $U_{ref} = 1,2\text{В}$, $I_{adj} = 50\text{ мкА}$ для наихудшего случая.

Выбирается R_1 равным 240 Ом (согласно документации), тогда из формулы (1) получается:

$$R_2 = \frac{U_o - U_{ref}}{\frac{U_{ref}}{R_1} + I_{adj}} = \frac{3,3\text{В} - 1,2\text{В}}{\frac{1,2\text{В}}{240\text{Ом}} + 50\text{мкА}} \approx 420\text{Ом}$$

Аналогичные вычисления выполняются для резисторов R3 и R4. Резистор R3 выбирается равным 240 Ом, $U_{ref} = -1,2\text{ В}$, $I_{adj} = 2\text{ мкА}$ для наихудшего случая, тогда R4 находится следующим образом:

$$R_4 = \frac{U_o - U_{ref}}{\frac{U_{ref}}{R_1} + I_{adj}} = \frac{-3,3\text{В} + 1,2\text{В}}{\frac{-1,2\text{В}}{240\text{Ом}} + 2\text{мкА}} \approx 420\text{Ом}$$

Сопротивления C3, C4 выбираются равными 10 мкФ согласно рекомендуемым значениям из типовой схемы для включения LM317 и LM337.

1.4.1. Расчет преобразователя

При расчете схемы сдвига/ослабления уровня напряжения зададимся значением резистора R7 равным 10 кОм. Учтем, что на выходной сигнал с преобразователя поступает на АЦП, оцифровываемое напряжение на котором должно быть 3,3 В. Также не стоит забывать, что фильтр на выходе преобразователя должен удовлетворять характеристике Баттеворта, для которой коэффициент усиления сигнала равен 1,6. Таким образом, на входе фильтра (выходе схемы сдвига/ослабления) сигнал должен быть в 1,6 раз ниже, чем на входе, т.е. быть в диапазоне от 0 до 2,0625 В. Коэффициент ослабления сигнала будет вычисляться по формуле 2.

$$K = \frac{|U_{ex}|}{|U_{max}| / 2} \quad (2),$$

где $U_{вх}$ – максимальная амплитуда входного сигнала, $U_{мах}$ – максимальное требуемое значение на выходе схемы, равное для данного случае 2,0625 В. $U_{мах}$ делится пополам, поскольку входной сигнал биполярный и далее его придется сдвинуть на $U_{мах}/2$.

Коэффициент ослабления будет равен $K = 5 \text{ В} / (2.0625 \text{ В} / 2) = 4,8$. Ослабление входного сигнала задается через резисторы R5 и R7 и определяется по формуле 3.

$$K_{осл} = R5 / R7 \quad (3)$$

Из выражения (3) получим, что $R5 = 10 \text{ кОм} * 4,8 = 48 \text{ кОм}$.

Для сдвига уровня на $U_{мах}/2 = 1 \text{ В}$, аналогично (3), получим, что $R6 = 3,3 \text{ В} / 1 \text{ В} * 10 \text{ кОм} = 33 \text{ кОм}$.

Для проверки выполним перерасчёт выходного напряжения сдвигателя/ослабителя сигнала согласно формуле 4.

$$U_{вых} = U_{ref} \frac{R7}{R6} + U_{вх \max} \frac{R7}{R5} \quad (4)$$

Согласно формуле (4), получим, что $U_{вых} = 3,3 \text{ В} * 10 \text{ кОм} / 33 \text{ кОм} + 5 \text{ В} * 10 \text{ кОм} / 48 \text{ кОм} = 2 \text{ В}$, при максимальном входном сигнале равном 5 В, и 0 В при минимальном входном сигнале -5 В, что и требовалось.

Кроме того необходимо выполнить условие баланса, вычисляемое по формуле 5.

$$\frac{R7}{R6} + \frac{R7}{R5} = \frac{R8}{R9} \quad (5)$$

Для разрешения уравнения (5) зададимся $R8 = 10 \text{ кОм}$, тогда получим $R9$ равное 19,5 кОм.

1.4.2. Расчет аналогового фильтра

Оцифровка сигнала выполняется с частотой дискретизации 128 кГц, что более чем в 6 раз превышает частоту среза для исходного сигнала равную 20 кГц. Согласно теореме Найквиста верхняя оцифруемая частота для сигнала получается 64 кГц. Таким образом, расчет аналогового фильтра выполняется для частоты среза равной 50 кГц с учетом запаса в виду постепенного затухания сигнала. Фильтрация сигнала для частоты среза в 20 кГц выполняется в программном виде с помощью цифрового КИХ фильтра.

Аналоговый фильтр выполняется по структуре Салена-Ки. Данный фильтр обеспечивает крутизну спада в полосе затухания порядка 40 дБ/дек. Для расчета фильтра по формуле 6 зададимся значением $R10$ в 8 кОм.

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (6)$$

где $R = R_{10} = R_{11}$, $C = C_6 = C_7$. Получим, что $C_6 = C_7 = 0,4 \text{ нФ}$.

Для обеспечения характеристика Баттерворта коэффициент усиления сигнала должен быть равен 1,6. Зададимся значением $R_{12} = 10 \text{ кОм}$, тогда для обеспечения указанного усиления $R_{13} = 10 \text{ кОм} * 1,6 = 16 \text{ кОм}$.

Для увеличения крутизны спада дополнительно добавляется конденсатор C_5 . Расчет осуществляется по формуле (6), где R - общее сопротивление параллельно подключенных R_8 и R_9 . Тогда, получим $C_5 = 0,48 \text{ нФ}$.

1.5. Моделирование схемы в Micro-Cap

Моделирование АЧХ фильтра выполняется в Micro-Cap при помощи частотного анализа. Данный анализ позволяет определить и проверить расчетное значение частоты среза с фактическим. Моделируемая схема представлена на рисунке 3.

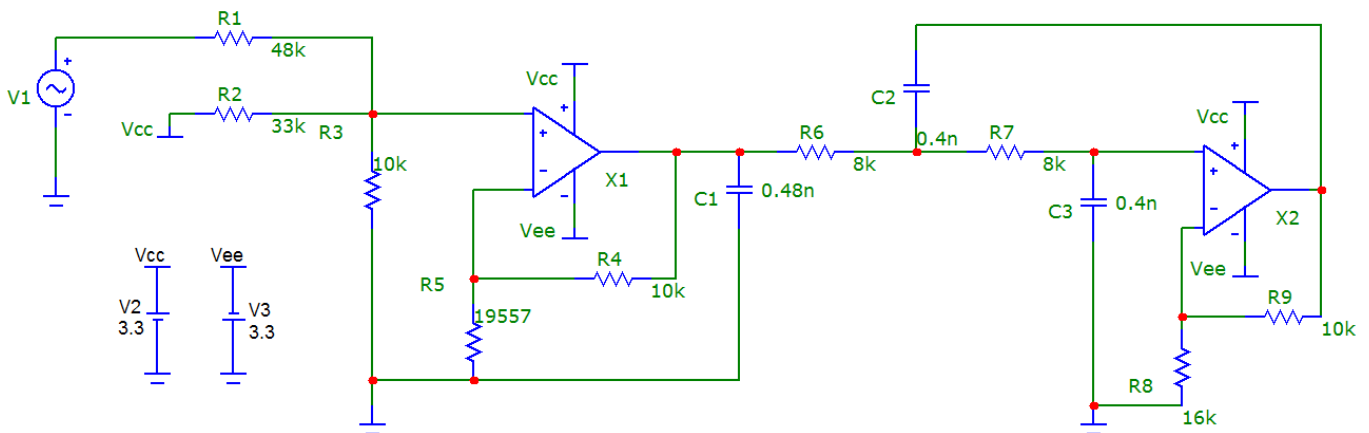


Рисунок 3 – Схема в Micro-Cap

На рисунке 4 представлены график логарифмической зависимости амплитуды от частоты, зависимость фазы от частоты и зависимость амплитуды от частоты соответственно.

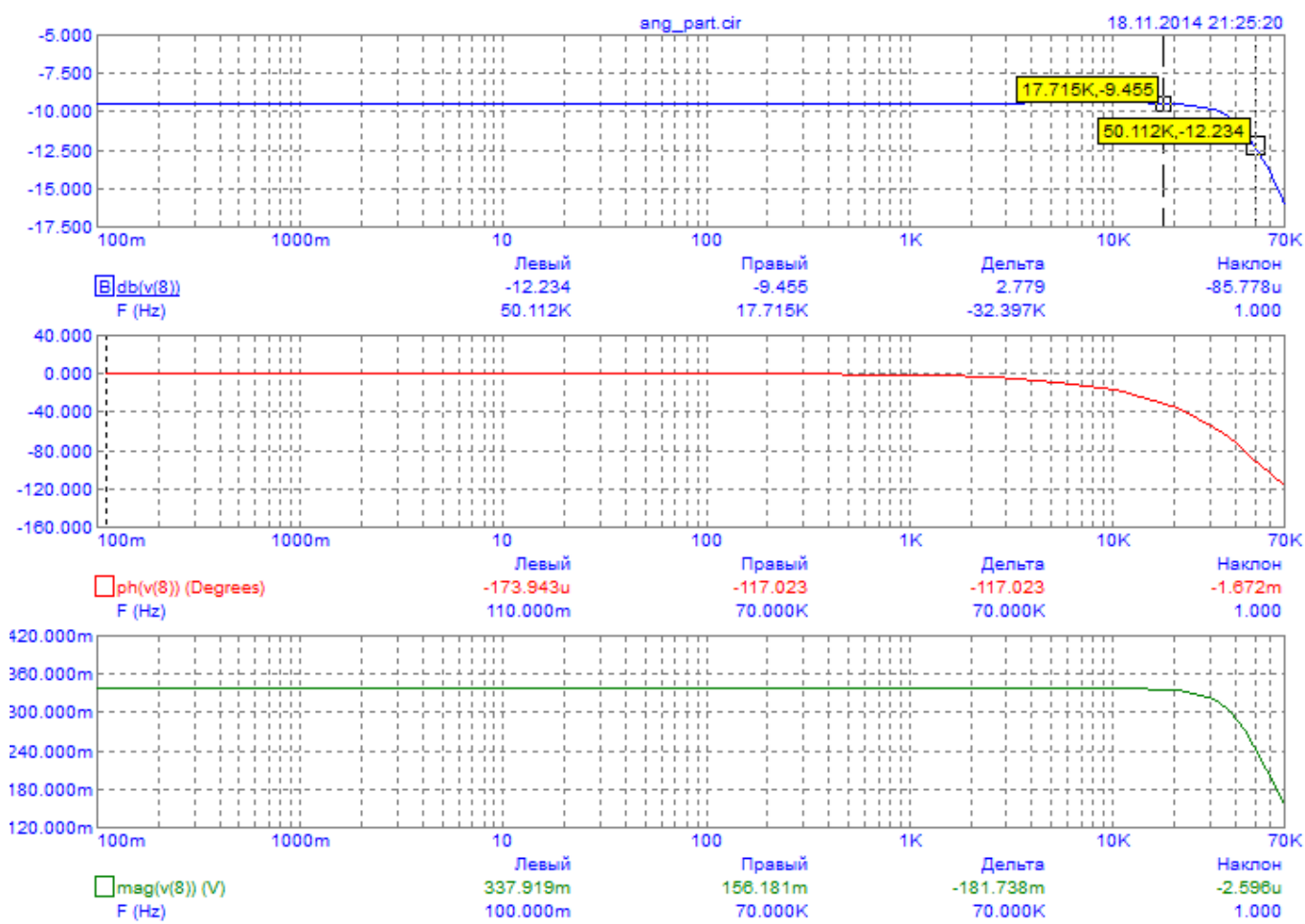


Рисунок 4 – Моделирование в Micro-Cap

2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

2.1. Разработка алгоритма

При подаче питания на микроконтроллер происходит прерывание по нулевому вектору, по нулевому адресу располагается инструкция передачи управления функции отключения сторожевого таймера. После исполнении данной функции управление передается функции `__c_int00`, которая добавляется автоматически на этапе компиляции приложения. После управление передается в точку входа `main`.

Диаграмма деятельности, описывающая основной ход исполнения программы представлена на рисунке 5.

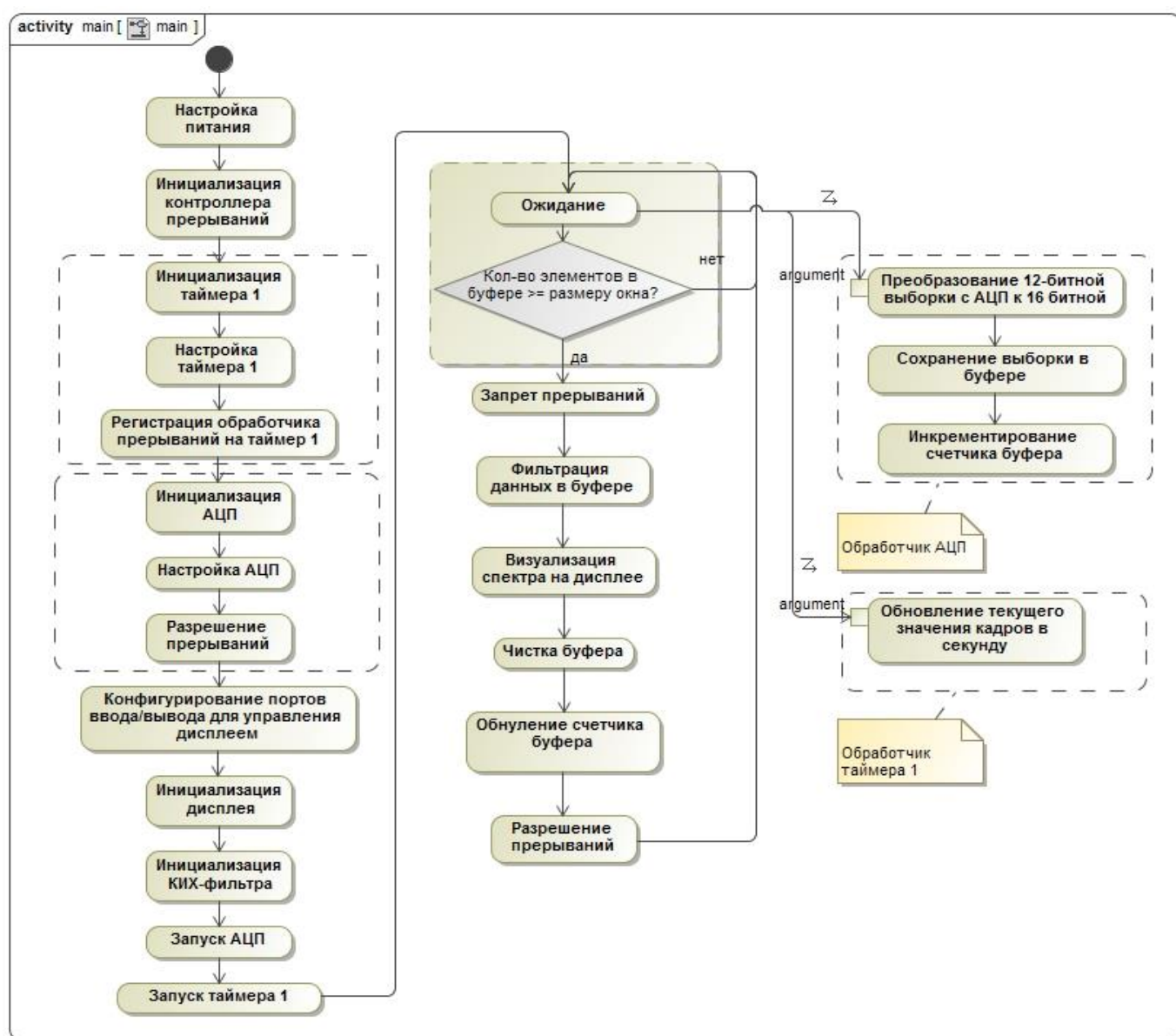


Рисунок 5 – Диаграмма деятельности приложения

При передаче управления в функцию *main* в первую очередь начинается многошаговая процедура инициализации периферийного оборудования. Сначала выполняется настройка питания микроконтроллера TMS320F28022DA: в качестве основного генератора тактовой частоты выбирается внутренний осциллятор, далее выставляются необходимые значения делителей частоты для 50 МГц. На конечном шаге настройки питания выполняется отключение питания всех периферийных устройств.

Далее выполняется настройка контроллера прерываний, которая включает инициализацию таблицы прерываний обработчиками по умолчанию и отключение прерываний всех устройств, а также очистку содержимого всех регистров контроллера.

После выполняется настройка первого таймера: он настраивается на частоту 10 Гц, включается активация прерываний, выполняется регистрации нового обработчика. В данном обработчике выполняется обновление актуального значения переменной, отвечающей за хранение количества кадров перерисовки графики на дисплее. Таким образом, обновление сведений о количестве кадров выполняется 10 раз за секунду.

Выполняется инициализация АЦП: включается питание, активация прерываний иницируется нулевым таймером с частотой 128 кГц на «ножку» INT1 процессора. Прием сигнала осуществляется по четвертому аналоговому каналу. Выполняется регистрация обработчика прерываний АЦП, которое срабатывает при окончании оцифровки единичной выборки. В обработчике выполняется преобразование 12-битной выборки к 16-битной, выборка сохраняется в буфере, инкрементируется значение счетчика данных в буфере.

Вышеупомянутыми действиями заканчивается настройка периферии микроконтроллера и начинается инициализация дисплея: выполняется настройка портов ввода/вывода шины данных/команд дисплея; подается команда включения дисплея и обнуляется содержимое его памяти.

На этом процедура инициализации заканчивается и устройство полностью готово к работе. Выполняется разрешение прерываний, запускается таймер 1, запускается таймер 0, начинается сбор данных по прерыванию. В основном цикле выполняется анализ счетчика данных буфера, если его значение равно или превышает размер окна БПФ, то:

- 1) запрещаются прерывания,
- 2) выполняется фильтрация данных из буфера. Коэффициенты цифрового КИХ фильтра рассчитываются в пункте 2.3,
- 3) выполняется расчет спектра данных с помощью итеративного алгоритма БПФ,

- 4) выполняется функция визуализации спектра на дисплее,
- 5) выполняется очистка буфера данных, обнуляется счетчик данных буфера,
- 6) разрешаются прерывания.

Далее управление передается вновь в бесконечный цикл, где анализируется текущее значение счетчика данных буфера.

2.2. Описание логической структуры

Для повышения удобства отладки и модификации программа разбита на модули. Физически модули разнесены в соответствующие каталоги. Иерархическая структура модулей и их разнесение по каталогам представлено на рисунке 6.

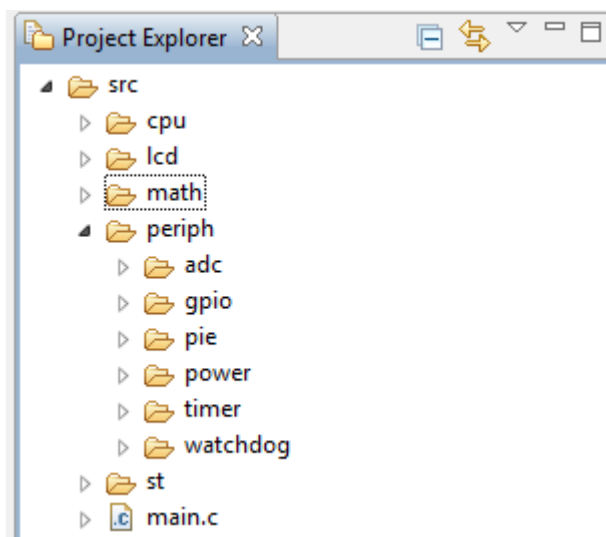


Рисунок 6- Модульная структура проекта

Краткое функциональное описание модулей представлено в таблице 3.

Таблица 3 – Краткое описание модулей

№ п/п	Модуль	Каталог	Описание
1	Board Support Package	src/cpu	Платформозависимый код, обособленные функции для работы с семейством TMS320F
2	LCD	src/lcd	Функции по работе с дисплеем HDG12864F-3
3	Math	src/math	Математические функции: операция свертки, функция БПФ, 16-битное умножение с фиксированной точкой
4	АЦП	src/periph/adc	Функции для работы с АЦП
5	GPIO	src/periph/gpio	Функции для работы с портами ввода/вывода
6	PIE	src/periph/pie	Функции для работы с контроллером прерываний
7	Power	src/periph/power	Функции для работы с питанием

№ п/п	Модуль	Каталог	Описание
8	Таймер	src/periph/timer	Функции для работы с таймерами
9	Сторожевой таймер	src/periph/watchdog	Функции для работы со сторожевым таймером
10	Service Tools	src/st	Сервисные вспомогательные функции

2.2.1. Модуль работы с периферией

Модуль работы с периферией реализуется в виде набора функций, контролирующих работу каждого устройства на протяжении жизненного цикла программы.

2.2.1.1. АЦП

Данный модуль предназначен для управления встроенным в микроконтроллер аналого-цифровым преобразователем. Список реализованных функций, и их описание приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Функции АЦП-модуля

№ п/п	Функция	Описание
1	adc_init	Инициализация АЦП. Выполняется включение питания АЦП. Настраивается работа по прерываниям: активируется по окончании завершения оцифровки одной выборки.
2	adc_configure	Выполняется настройка параметров АЦП через поля структуры, в том числе номер прерывания, номер измерения, таймер, по которому иницируются прерывания, номер аналогового порта, по которому осуществляется оцифровка входного сигнала, частота дискретизации.
3	adc_register_isr	Регистрация пользовательского обработчика прерываний АЦП
4	adc_start	Запуск оцифровки сигнала путем старта таймера
5	adc_read_result	Чтение 12-битной оцифрованной выборки данных из соответствующего регистра

2.2.1.2. Порты ввода/вывода

Данный модуль предназначен для управления цифровыми и аналоговыми портами ввода/вывода. Функции данного модуля используются другими модулями, таким как модуль дисплея, АЦП. Список реализованных функций, и их описание приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Функции GPIO-модуля

№ п/п	Функция	Описание
1	gpio_aio_configure	Настройка аналогового порта. В качестве параметров передаётся номер порта, а желаемая выполняемая функция портом.
2	gpio_dig_configure	Настройка цифрового порта. В качестве параметров передаётся номер порта, а желаемая выполняемая функция портом, настройка направления: ввод/вывод.

2.2.1.3. Контроллер прерываний

Данный модуль предназначен для управления встроенным контроллером прерываний. Список реализованных функций и их описание приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Функции PIE-модуля

№ п/п	Функция	Описание
1	pie_init	Инициализация контроллера прерываний, включающая заполнение таблицы прерываний обработчиками по умолчанию.
2	pie_allow_interrupt	Функция разрешения прерывания. В виду специфичности контроллера в качестве параметров передается минорный и мажорный номера прерывания.

2.2.1.4. Питание

Данный модуль предназначен для управления питанием контроллера. Список реализованных функций и их описание приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Функции управления питанием

№ п/п	Функция	Описание
1	power_clock_init	Инициализация питания микроконтроллера: выбор в качестве тактового генератора внутреннего, установка настройка делителей частоты в соответствии с частотой 50 МГц, отключение питания всей периферии.

2.2.1.5. Таймеры

Данный модуль предназначен для управления тремя встроенными в микроконтроллер таймерами. Данные таймеры используются для инициации начала оцифровки модулем АЦП, также для фиксации значения количества кадров отображаемой графики на дисплее. Список реализованных функций и их описание приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Функции управления таймерами

№ п/п	Функция	Описание
1	timers_init	Обнуление регистровых файлов всех таймеров, инициализация программных структур
2	timer_configure	Настройка таймера, в качестве параметра передается структура с настройками соответствующего таймера, где указывается, период таймера в Гц, номер таймера.
3	timer_register_isr	Регистрация обработчика прерывания на соответствующий таймер, номер которого передается в качестве параметра.
4	timer_start	Запуск таймера

2.2.1.6. Сторожевой таймер

Данный модуль предназначен для управления сторожевым таймером, и включает в себя одну функцию – функцию его отключения.

2.2.2. Модуль математических расчетов

Данный модуль включает функции, необходимые для непосредственного расчета спектра. Процесс обработки входного сигнала включает в себя его фильтрацию, основой которой является операция свертки, а также преобразование Фурье, на выходе которого представление сигнала в частотной плоскости.

Все математические операции выполняются в целочисленном 16-битном формате. Для выполнения цифровой обработки данные представляются в формате Q15, что подразумевает рассмотрение 16-битного полуслова, как числа с запятой в диапазоне от -1 до 1, 1 бит отводится под знак, 15 бит – под дробную часть единицы.

2.2.2.1. БПФ

Для вычисления спектра используется быстрый алгоритм преобразования Фурье с прореживанием времени по модулю два. Пусть на входе имеется блок длиной N, после чего начинается его разбиение на четную/нечетную половинки, далее каждую из этих половинок так же разбивается на четную и нечетную половинку и так до тех пор пока длина половинок не будет равна 2. Когда остаются половинки, состоящие только из двух сэмплов, начинается расчет БПФ для каждой такой половинки. Когда расчет БПФ для каждой половинки состоящей из 2-х сэмплов окончен, начинается расчет БПФ для половинок состоящих из 4-х и т.д, пока не процесс не дойдет до половинки, длина которой равна длине блока N.

При «сшивании» чётных/нечетных половинок используется следующая формула:

$$\begin{aligned} F(k) &= F0(k) + W_N^k F1(k), k = 0..N/2-1 \\ F(k + N/2) &= F0(k) - W_N^k F1(k), k = 0..N/2-1 \end{aligned} \quad (7)$$

где $W_N^k = e^{-i\frac{2\pi}{N}k}$ - вычисляется по формуле Эйлера с использованием функций синуса и косинуса. Для упрощения и ускорения используется таблица синусов, косинусов, размещаемая во flash-памяти контроллера.

Модуль расчета БПФ состоит из одной функции *fix_fft_iq*, на вход которой передается входной сигнал в виде массива 16-битных данных, оцифрованных при помощи АЦП. Величина массива равна 64, что на частоте оцифровки 128 кГц определяет максимальную частоту сигнала в 64 кГц, отображаемый шаг частот после БПФ будет равен 2 кГц.

2.2.2.2. Свертка

В основе КИХ фильтра лежит операция свертки:

$$y(n) = \sum_{m=0}^n h(m)x(n-m), \quad (8)$$

где $y(n)$ – выходная последовательность, $h(m)$ – импульсная характеристика фильтра, $x(n)$ – входная фильтруемая последовательность.

Во избежание переполнения фильтра необходимо убедиться, сумма всех нормализованных коэффициентов фильтра меньше единицы.

2.2.3. Модуль работы с дисплеем

Модуль для работы с дисплеем HDG12864F-3 предназначен для управления его функциями, визуализации полученного при помощи БПФ спектра. Список реализованных функций представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Функции управления LCD

№ п/п	Функция	Описание
1	lcd_init	Инициализация дисплея: включение дисплея, обнуление памяти дисплея
2	lcd_point	Установка точки по заданным координатам
3	lcd_rect	Рисование закрашенного прямоугольника
4	lcd_print_char	Вывод символа (не все символы поддерживаются)
5	lcd_print_str	Вывод строки
6	lcd_print_num	Вывод числа в десятичной системе счисления
7	lcd_gpio_configure	Настройка портов ввода/вывода в качестве шины команд/данных дисплея

2.3. Синтез цифрового фильтра в MATLAB

Для синтеза цифрового фильтра использовалась утилита fdatool в составе пакета MATLAB.

При синтезе указаны следующие параметры: КИХ фильтр низких частот, верхняя частота пропускания 20 кГц, нижний порог частоты затухания 25 кГц, данное соотношение частот позволяет добиться приемлемого количества коэффициентов импульсной характеристики фильтра. С этой же целью подавление было выбрано равным 40 дБ. Параметры фильтра и полученная АЧХ представлены на рисунке 7.

Полученные коэффициенты могут быть импортированы в С файл, и представлены в виде чисел с фиксированной точкой в формате Q15. Но необходимо проверить удовлетворение условия,

при котором сумма всех коэффициентов должна быть меньше 1 во избежание переполнения фильтра в процессе работы.

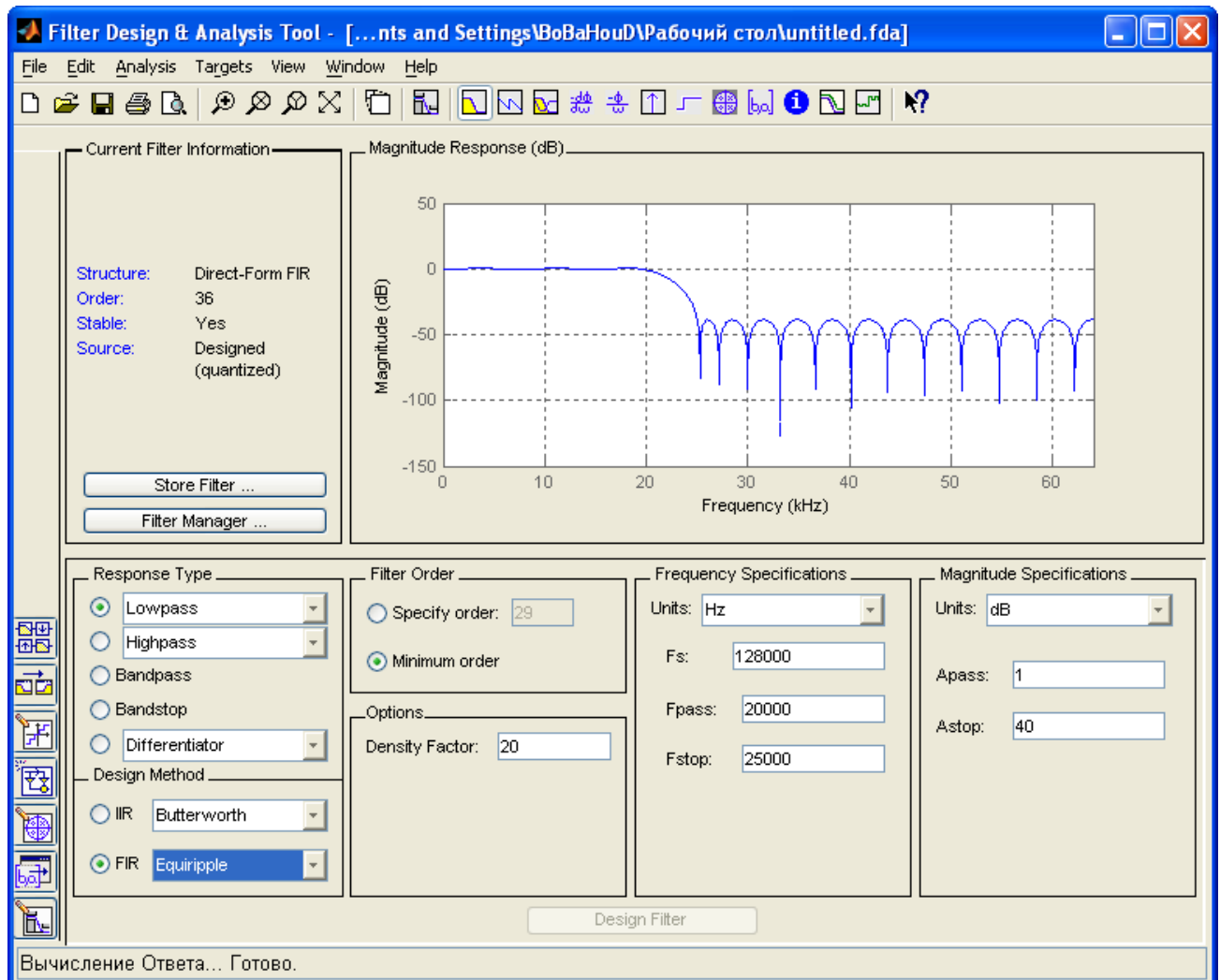


Рисунок 7 – Синтез КИХ фильтра

Для полученного фильтра сумма модулей всех коэффициентов равна 1,8324, что потенциально опасно, и может привести к переполнению фильтра, поэтому все коэффициенты были помножены на 0,5457.

3. СИМУЛЯЦИЯ В ISIS PROTEUS

На рисунке 8 представлен демонстрационный скриншот симуляции спектроанализатора в среде ISIS Proteus.

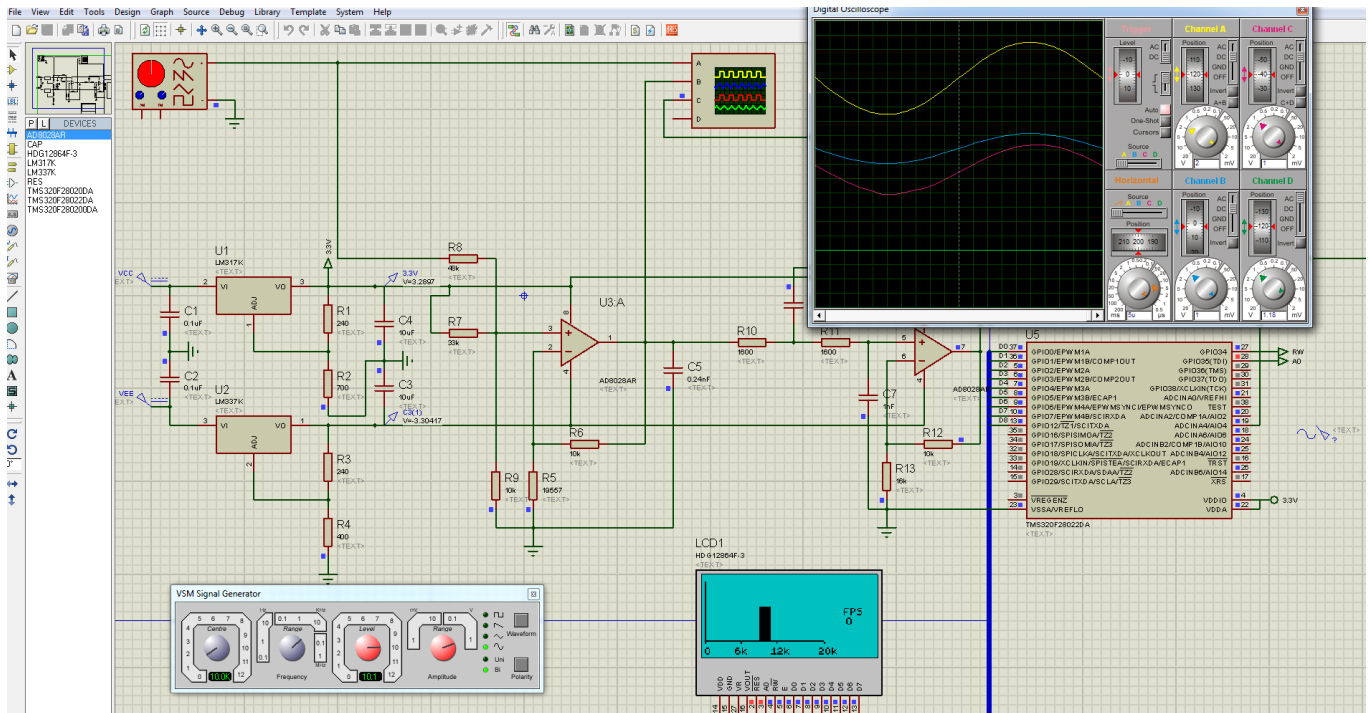


Рисунок 8 – Симуляция спектроанализатора в ISIS Proteus

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной лабораторной работы был спроектирован спектроанализатор для заданных параметров. Были на практике закреплены знания цифровой обработки сигналов. Работоспособность спектроанализатора была доказана путем его симуляции в среде ISIS Proteus.