

1 Введение

План: [ссылка на план выполнения](#)

Тема: Генератор сигналов специальной формы на основе схем с программируемой логикой.

Цель: Разработка генератора сигналов специальной формы на основе схем с программируемой логикой.

Задачи:

1. Анализ технических характеристик генераторов специальной формы (ГССФ) и уточнение требований к его реализации на основе ПЛИС.
2. Анализ системы формирования частот в базисе ПЛИС.
3. Разработка кода поведенческого описания ГССФ формы на основе схем с программируемой логикой.
4. Моделирование ГССФ инструментами САПР Vivado.
5. Тестовые испытания ГССФ на основе отладочной платы с ПЛИС. Демонстрация воспроизведения сигналов произвольной формы.

Функционал устройства:

1. Предустановленные формы сигналов: синусоида, меандр, пилообразный и треугольный.
2. Управление основными параметрами: частота, амплитуда, смещение, фаза.
3. Функционал "произвольной формы". Загрузка пользовательской формы из внешнего источника.
4. Опционально добавить возможность сгенерировать конечное количество периодов.

2 Генерация сигналов

В устройстве будет использоваться DDS (Direct Digital Synthesis).

Простейший DDS выглядит так: двоичный счетчик формирует адрес для ПЗУ, куда записана таблица одного периода функции синусоиды, отсчеты с выхода ПЗУ поступают на ЦАП, который формирует на выходе синусоидальный сигнал, подвергающийся фильтрации в ФНЧ и поступающий на выход.

Для перестройки выходной частоты используется делитель с переменным коэффициентом деления, на вход которого поступает тактовый сигнал с опорного генератора.

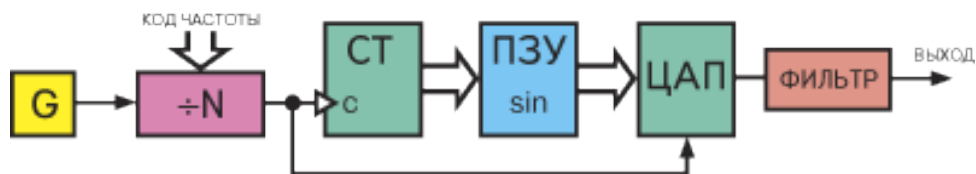


Рисунок 1 — Архитектура DDS генератора.

Частота, амплитуда и фаза сигнала в любой момент времени точно известны и подконтрольны. Единственным элементом, который обладает свойственной аналоговым схемам нестабильностью, является ЦАП. Высокие технические характеристики стали причиной того, что в последнее время DDS вытесняют обычные аналоговые синтезаторы частот.

Архитектура DDS в моем устройстве будет следующей:

CLK GEN \Rightarrow Аккумулятор фазы \Rightarrow ЦАП \Rightarrow Аналоговый сигнал

2.1 Аккумулятор фазы

```
1 logic [31:0] phase_acc;  
2  
3 always_ff @(posedge clk) begin  
4     phase_acc <= phase_acc + phase_inc;  
5 end
```

2.2 Генератор частоты DDS

Формула частоты DDS:

$$F_{out} = (phase_inc * F_{clk}) / 2^N \quad (1)$$

где F_{out} – выходная частота, F_{clk} – тактовая частота ПЛИС, $phase_inc$ – слово настройки, N – разрядность аккумулятора.

Если тактовая частота ПЛИС 100 МГц, разрядность аккумулятора 32 бит, я хочу синусоиду $F_{out} = 1\text{кГц}$, тогда:

$$phase_inc = F_{out} * (2^N) / F_{clk}$$

$$phase_inc = 1000 * 4294967296 / 1000000000 \approx 42949673 (0x028F5C29 \text{ в hex})$$

Аккумулятор фазы – это просто счетчик, который на каждом такте увеличивается на `phase_inc`

2.2.1 Режимы работы DDS в ГССФ

Синусоида Для генерации синусоиды для отсчетов из таблицы брать старшие биты аккумулятора фазы.

$$phase_acc \Rightarrow \text{старшие биты} \Rightarrow sine_table[addr] \Rightarrow \text{ЦАП}$$

Меандр Для генерации меандра заданной частоты нужен только аккумулятор фазы, из которого буду брать старший бит.

```
1 square_wave = phase_acc[31]; // 0 or 1
```

Когда `phase_acc` переполняется, старший бит меняется $0 - 1 - 0 - 1 \dots$

Пилообразный сигнал Для генерации пилообразного сигнала можно взять старшие 12 бит фазы как амплитуду.

```
1 sawtooth = phase_acc[31:20];
```

Получится $0, 1, 2, \dots, 4095, 0, 1, 2 \dots$ что и будет являться пилой.

Треугольный сигнал Для его генерации возьмем старший бит аккумулятора фазы как индикатор возрастания или убывания.

```
1 if (phase_acc[31] == 0)
2     triangle = phase_acc[30:19]; // increment
3 else
4     triangle = ~phase_acc[30:19]; // decrement
```

Произвольная форма Вместо таблицы `sine_table` используется BRAM с пользовательскими данными.

```
1 arb_wave = user_bram[phase_acc[31:22]];
```

2.3 Проблемы DDS и их решения

2.3.1 Ступенчатость на выходе ЦАП

Решение: Фильтр низких частот (аналоговый RC/LC фильтр)

2.3.2 Спектральная чистота

Решение:

1. Увеличение разрядности таблицы
2. Добавление dithering
3. Интерполяция между точками таблицы

3 Загрузка сигнала произвольной формы

Можно использовать ESP32 микроконтроллер для загрузки файла с отсчетами через веб-интерфейс.

Связать ESP32 - ПЛИС можно через UART или SPI. SPI будет работать быстрее.

Возможно придется определить протокол обмена:

```
1      SET_FREQ:<32-bit-phase-word>\n
2      SET_WAVE:SINE\n
3      SET_WAVE:ARB\n
4      LOARD_ARV:<data-size>\n
```

ESP32 будет либо создавать точку доступа WiFi для подключения к нему и хостить сервер в локальной сети, либо будет подключаться к WiFi и хостить сервер там, но я думаю лучше будет просто создавать точку доступа WiFi.