|  |  |
| --- | --- |
|  | **Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  **высшего образования**  **«Московский государственный технический университет**  **имени Н.Э. Баумана**  **(национальный исследовательский университет)»**  **(МГТУ им. Н.Э. Баумана)** |

|  |  |
| --- | --- |
| ФАКУЛЬТЕТ | «Радиоэлектроника и лазерная техника (РЛ)» |
| КАФЕДРА | «Технологии приборостроения (РЛ6)» |

**РАСЧЁТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА**

***К КУРСОВОЙ РАБОТЕ***

***НА ТЕМУ:***

*«Устройство программно-аппаратного синтеза звука»*

***ПО КУРСУ***

*«Цифровая электроника и микропроцессорная техника»*

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Студент | РЛ6-71 |  |  |  | Г.С. Сарайкин |
|  | (группа) |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |
| Руководитель курсового проекта |  |  |  |  | Д. А. Семеренко |
|  |  |  | (подпись, дата) |  | (И.О. Фамилия) |
|  |  |  |  |  |  |

*2024 г.*

Содержание

[Введение 3](#_Toc183013222)

[1. Обзор существующих решений 4](#_Toc183013223)

[2. Алгоритм работы 7](#_Toc183013224)

[Приложение А. Формат команд управления параметрами синтеза 12](#_Toc183013225)

[Приложение Б. Формат пакетов обмена данными между микроконтроллером и ПК 21](#_Toc183013226)

[Приложение В. Формат файла данных синтеза 25](#_Toc183013227)

[Список литературы 28](#_Toc183013228)

# Введение

Аппаратный синтез звука с программным управлением может применяться в устройствах тестирования звуковой аппаратуры и синтезаторах.

Формирование сигнала возможно с помощью специализированных микросхем или использования аппаратных возможностей цифровых вычислительных устройств.

В курсовой работе реализован синтез методами DDS и ШИМ, также реализован сэмплерный синтез. Синтез реализован аппаратно с программным управлением, что позволяет достичь управления тембром и громкостью каналов во времени.

Цель работы — разработать устройство, генерирующее звук при помощи сэмплерного синтеза, а также методами DDS и ШИМ.

Назначение устройства — генерация семи сигналов, которые впоследствии суммируются и подаются на звуковой разъём.

# 1. Обзор существующих решений

Стандартным методом формирования звуковых сигналов является использование ЦАПов с разнообразными устройствами, формирующими входящий в них поток цифровых данных.

Метод синтеза DDS (англ. Direct Digital Synthesis, прямой цифровой синтез звука) заключается в формировании сигнала при помощи преобразования цифрового значения фазы в цифровые значения мгновенной амплитуды по определённому закону. Фаза задаётся при помощи регистра аккумулятора фазы, к значению в котором с каждым тактом системной частоты прибавляется значение регистра, хранящего текущую настройку частоты. Благодаря тому, что регистр фазы переполняется (при сложении разряд переполнения отбрасывается), достигается циклическое нарастание значения фазы в регистре. Это позволяет синтезировать повторяющуюся во времени волну, установив закон соответствия выходной амплитуды текущему значению фазы [1]. Обобщённая функциональная схема DDS-генератора представлена на Рисунке 1.

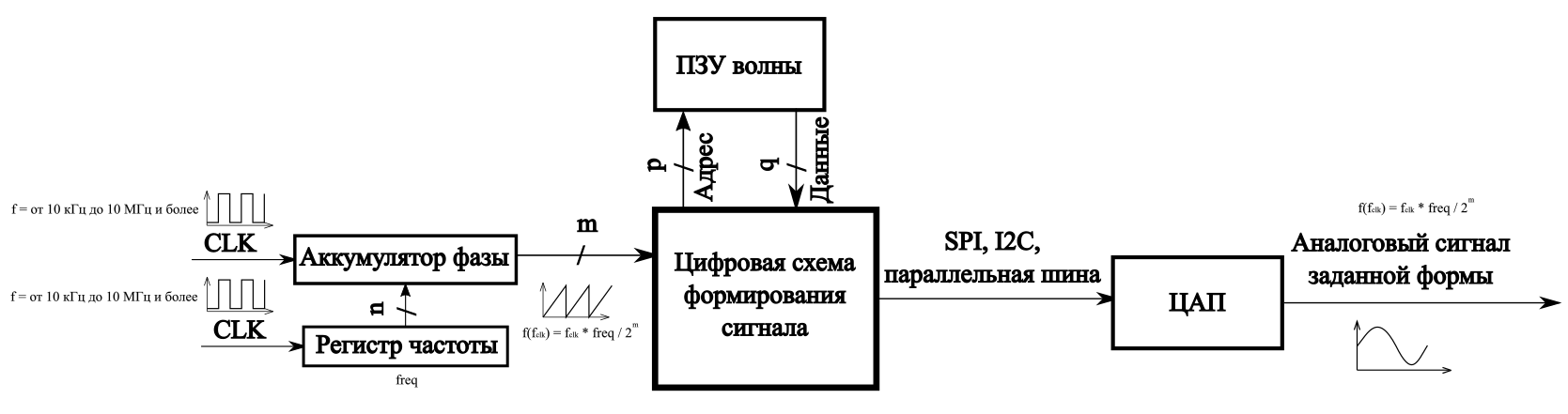


Рисунок 1 — Обобщённая функциональная схема DDS-генератора

Синтез ШИМ-сигнала при помощи таймера микроконтроллера заключается в создании выходного ШИМ-сигнала на основании текущих значений коэффициента заполнения и периода импульсов. Эти значения хранятся в регистрах таймера, реализованного внутри микроконтроллера. При изменении коэффициента заполнения меняется спектральный состав выходного сигнала. При частоте импульсов, попадающей в диапазон слышимости человека, изменение коэффициента заполнения воспринимается как изменение тембра звучания волны. Применение ШИМ-сигнала для синтеза используемых в электронной музыке звуков объясняется в [2]. Обобщённая функциональная схема ШИМ-генератора представлена на Рисунке 2.

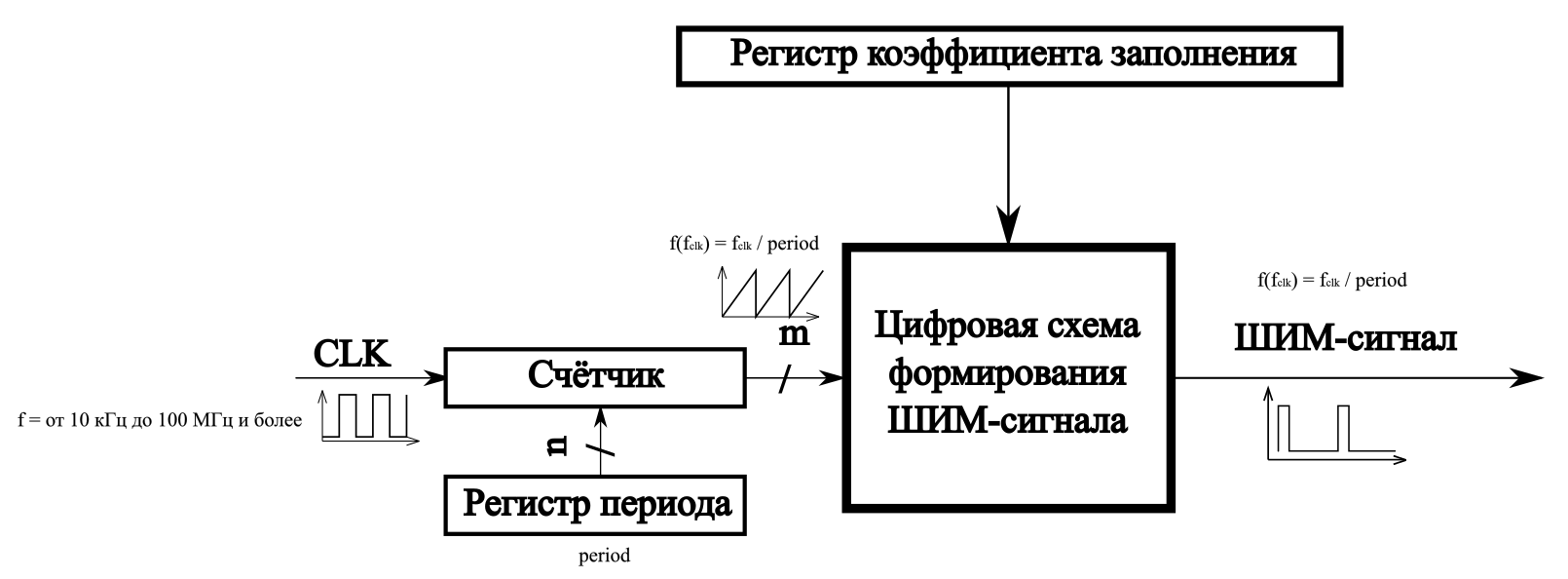


Рисунок 2 — Обобщённая функциональная схема синтезатора ШИМ-сигнала

Сэмплерный синтез заключается в проигрывании при помощи ЦАПа хранимых в памяти наборов отсчётов оцифрованного звука, называемых сэмплами. Сэмпл можно воспроизвести целиком однократно, воспроизводить циклично целиком или проиграть часть сэмпла однократно, а оставшуюся часть циклично. Этот метод синтеза позволяет воспроизводить практически неограниченный набор звуков. Ограничениями метода являются глубина и частота дискретизации сэмплов и количество памяти, в которую записаны эти сэмплы [3].

Таблично-волновой синтез аналогичен сэмплерному синтезу за исключением того, что вместо сэмплов используются короткие наборы отсчётов (волновые таблицы), циклично воспроизводящиеся во времени. В результате получается волна, тембр которой можно менять, меняя эти наборы отсчётов [4].

Обобщённая функциональная схема сэмплерного/таблично-волнового синтезатора представлена на Рисунке 3.



Рисунок 3 — Обобщённая функциональная схема сэмплерного/таблично-волнового синтезатора

Аналогами устройства являются звуковые чипы — специализированные микросхемы, основным назначением которых является генерация одного или нескольких сигналов, сумма которых в виде аналогового сигнала или потока цифровых данных подаётся на выход микросхемы.

В качестве примера звукового чипа можно привести MOS Technology SID. Это микросхема трёхканального звукогенератора. Каждый канал может воспроизводить треугольную волну, шум, пилообразную волну или прямоугольную волну с настраиваемым коэффициентом заполнения. Частота волны каждого канала настраивается независимо. Для каждого канала реализована аппаратная ADSR-огибающая громкости. Сигнал каждого из каналов можно либо подключать напрямую на выход микросхемы, либо пропускать через аналоговый многорежимный фильтр с цифровым управлением. У фильтра настраиваются частота среза, добротность и режим (фильтр нижних частот, фильтр верхних частот, полосовой фильтр или любая комбинация этих режимов) [5].

# 2. Алгоритм работы

Устройство генерирует звук с помощью внешних DDS-генераторов (синус, треугольная и квадратная волны), внутренних таймеров микроконтроллера (ШИМ, прямоугольная волна с изменяемым коэффициентом заполнения), внешнего генератора шума (псевдо-белый шум), внутренних таймеров микроконтроллера в связке с внутренними ЦАПами (волновые таблицы и сэмплы). Эти сигналы проходят через программно управляемые аттенюаторы, что позволяет задавать уровень и огибающую громкости. Сигнал одного из DDS-генераторов проходит через цифровой фильтр нижних частот пятого порядка с АЧХ Баттерворта. Частота среза фильтра зависит от частоты тактирования фильтра [6].

В устройстве также реализовано пять таймеров сброса фазы. Для каждого таймера настраиваются каналы, на которые он воздействует. При каждом срабатывании таймера сбрасывается фаза всех каналов, на которые он воздействует. Описание принципа сброса фазы см. в описании соответствующих команд в Приложении А.

Функциональная схема устройства приведена на Рисунке 4.

Электрическая принципиальная схема устройства приведена на Рисунке 5.

C:\Users\Georg\Nextcloud\курсач_семеренко\STM32CrapSynth\func.emf

Рисунок 4 — Функциональная схема устройства

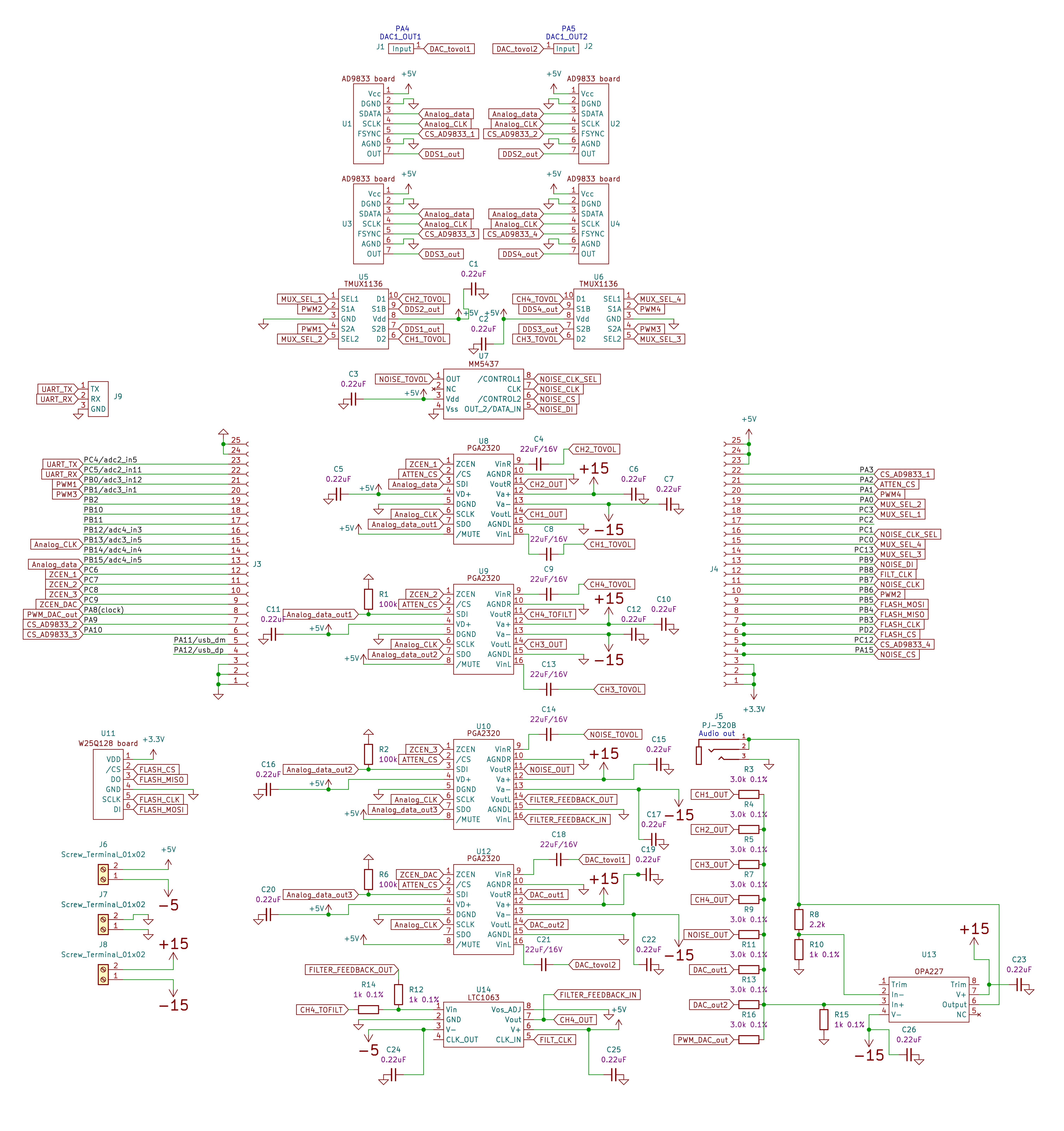


Рисунок 5 — Электрическая принципиальная схема устройства

Сэмплы необходимо хранить во внутренней флэш-памяти микроконтроллера и во внутренней оперативной памяти. Волновые таблицы и последовательность команд, изменяющих параметры синтеза, необходимо хранить во внешней флэш-памяти, подключённой по последовательному интерфейсу передачи данных.

Программное управление осуществляется через интерфейс UART. ПК посылает команды, которые исполняются устройством. Команды позволяют запускать или останавливать исполнение потока команд, записанного во внешнюю флэш-память, а также позволяют загружать новые данные с ПК во внешнюю флэш-память (в этом случае ПК выдаёт команду, содержащую в себе данные, а микроконтроллер принимает её, записывает данные в память, и отсылает сообщение, подтверждающее приём данных).

Команды, хранящиеся во внешней флэш-памяти, состоят из байта, кодирующего тип команды, и номера канала, параметры которого она меняет. После команды может следовать один или несколько байтов параметров команды, которые определяют новое значение параметра канала, к которому относится команда. Формат команд описан в Приложении А.

Обмен данными между микроконтроллером и внешней флэш-памятью осуществляется при помощи контроллера DMA по SPI.

Исполнение команд происходит через фиксированные интервалы времени, отсчитываемые одним из таймеров микроконтроллера (далее — таймер исполнения команд). Каждый раз, когда происходит срабатывание таймера, в обработчике прерывания таймера выставляется флаг запроса исполнения команд. В основном потоке программы постоянно проверяется установка флага, и при его установке начинается исполнение команд. По окончании исполнения команд флаг сбрасывается.

Данные с ПК передаются при помощи специально разработанной программы с интерфейсом командной строки. Эта программа читает файл, название которого задаётся пользователем. В файле записаны последовательность команд и сэмплы. Программа формирует команды с пакетами данных, передаваемые микроконтроллеру, и ожидает подтверждения приёма от микроконтроллера. Пакеты данных содержат информацию, прочитанную программой из файла. Формат пакетов, которыми обмениваются микроконтроллер и программа, приведён в Приложении Б. В консоль выводится информация о прогрессе передачи данных, обновляемая с каждой передачей пакета данных. После передачи всех данных пользователю предоставляется возможность запускать или останавливать исполнение потока команд.

Формат файла приведён в Приложении В.

# Приложение А. Формат команд управления параметрами синтеза

Команды делятся на обычные и служебные. Обычные команды предназначены для изменения одного из параметров синтеза определённого канала, в то время как служебные команды контролируют порядок выполнения обычных команд. Общий формат команд представлен в Таблице А1.

Таблица А1

|  |  |
| --- | --- |
| Байт 1 | Байты 2, 3, … |
| Байт команды | Параметр(-ы) (размер и наличие зависят от команды) |

Формат обычных команд для каналов DDS/ШИМ представлен в Таблице А2. Формат обычных команд для канала шума представлен в Таблице А3. Формат команд для каналов сэмплов представлен в Таблице А4. Формат команд для каналов таймеров сброса фазы представлен в Таблице А5. Формат служебных команд представлен в Таблице А6.

Нумерация каналов начинается с нуля. Соответственно, для DDS/ШИМ каналов номер лежит в диапазоне от 0 до 3. Для каналов ЦАПов номер лежит в диапазоне от 0 до 1. Для каналов таймеров ресета фазы номер лежит в диапазоне от 0 до 4.

Каждый байт параметра представляется в виде двух латинских букв, написанных слитно, например, **aa**. Если параметр имеет размер более одного байта, он представляется в виде нескольких групп из двух латинских букв, например, **aa aa**. В таком случае сначала следует младший байт, а потом старший. Такой порядок байтов сохраняется и при большем размере параметра (3 и более байтов), в этом случае сначала идёт самый младший байт, потом следующий за ним, и так далее до самого старшего байта. В случае наличия нескольких параметров каждый параметр обозначается своими буквами. Например, **aa aa bb** значит, что сначала следует один параметр размером два байта, а после него следует второй параметр размером один байт.

Если количество битов параметра не кратно восьми (например, написано, что значение параметра занимает 14 бит, а сам параметр занимает два байта, т.е. 16 бит), то используются только младшие биты (в описанном случае используются 14 младших бит, два старших бита не используются и игнорируются при исполнении команды).

Если указано использование конкретных значений параметра, например, описаны значения от 0 до 5, то значения параметра, не попадающие в диапазон, не приводят к какому-либо изменению параметров синтеза. При этом выполнение команд не прерывается.

Если информации о параметре не указано, то параметр отсутствует, и команда занимает один байт.

Таблица А2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Описание команды | Значение байта команды, — номер канала | Формат параметра(-ов) | Описание функций команды и параметра(-ов) |
| Установка громкости |  | **vv** | **vv** — громкость канала. Если **vv** = 0, то громкость равна нулю, иначе громкость равна (**vv)**дБ для типов волн 1 и 2 и (**vv)**дБ для типов волн 3 и 4. |
| Установка типа волны |  | **ww** | **ww** — тип волны, синтезируемой каналом:  0 — нет сигнала;  1 — синус;  2 — треугольная волна;  3 — квадратная волна;  4 — квадратная волна с удвоенной частотой;  5 — прямоугольная волна с настраиваемым коэффициентом заполнения. |
| Частота для типов волн от 1 до 4 |  | **ff ff ff ff** | **ff ff ff ff** — 28-битное целое положительное число, задающее частоту сигнала по формуле . Максимальная частота составляет 12,5 МГц для типа волны 1 и 2 МГц для остальных типов. |
| Сброс фазы |  |  | При исполнении этой команды фаза волны принудительно устанавливается равной нулю вне зависимости от типа волны и текущих значений частоты и фазы. |
| Частота для типа волны 5 |  | **pp aa aa** | **pp** — предделитель частоты, **aa aa** — делитель частоты. Частота сигнала вычисляется по формуле . |
| Коэффициент заполнения для типа волны 5 |  | **dd dd** | **dd dd** — коэффициент заполнения. Реальный коэффициент заполнения вычисляется по формуле , где — текущее значение делителя частоты (см. описание предыдущей команды). |
| Включение изменения громкости по пересечению нуля |  |  | Команда применяется к паре каналов (пары каналов: 0 и 1, 2 и 3) одновременно при исполнении команды для одного из этих каналов |
| Выключение изменения громкости по пересечению нуля |  |  | Команда применяется к паре каналов (пары каналов: 0 и 1, 2 и 3) одновременно при исполнении команды для одного из этих каналов |

Таблица А3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Описание команды | Значение байта команды | Формат параметра(-ов) | Описание функций команды и параметра(-ов) |
| Установка громкости |  | **vv** | **vv** — громкость канала. Если **vv** = 0, то громкость равна нулю, иначе громкость равна (**vv)**дБ. |
| Тактирование генератора шума от внутреннего источника |  |  | Частота тактирования составляет примерно 100 кГц |
| Тактирование генератора шума от внешнего источника |  |  | Частота тактирования настраивается командой «Частота внешнего тактирования» |
| Включение изменения громкости по пересечению нуля |  |  |  |
| Выключение изменения громкости по пересечению нуля |  |  |  |
| Частота внешнего тактирования |  | **pp aa aa** | **pp** — предделитель частоты, **aa aa** — делитель частоты. Частота тактирования генератора шума вычисляется по формуле . |
| Сброс фазы |  |  | Команда загружает в РСЛОС генератора шума значение, заданное командой «Установка начального состояния РСЛОС» |
| Установка начального состояния РСЛОС |  | **ll ll ll** | **ll ll ll** — 23-битное значение состояния РСЛОС |

Таблица А4

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Описание команды | Значение байта команды, — номер канала | Формат параметра(-ов) | Описание функций команды и параметра(-ов) |
| Установить громкость канала |  | **vv** | **vv** — громкость канала. Если **vv** = 0, то громкость равна нулю, иначе громкость равна (**vv)**дБ. |
| Начать воспроизведение сэмпла |  |  | Сэмпл начинает воспроизводиться с заданными ранее начальными параметрами (см. следующие команды) |
| Начать воспроизведение сэмпла с зацикливанием |  |  | Сэмпл начинает воспроизводиться с заданными ранее начальными параметрами (см. следующие команды). При этом учитывается настройка точки зацикливания |
| Начать воспроизведение волновой таблицы |  |  | Волновая таблица начинает воспроизводиться с заданными ранее начальными параметрами (см. следующие команды) |
| Остановить воспроизведение волновой таблицы или сэмпла |  |  |  |
| Задать стартовый адрес сэмпла во внутренней флэш-памяти |  | **ss ss ss** | **ss ss ss** — сдвиг начала сэмпла относительно начала области внутренней флэш-памяти, отведённой под сэмплы |
| Задать стартовый адрес сэмпла в ОЗУ |  | **ss ss** | **ss ss** — сдвиг начала сэмпла относительно начала области ОЗУ, отведённой под сэмплы |
| Сброс фазы волновой таблицы или сэмпла |  |  | В случае волновой таблицы фаза волны, представленной в ней, сбрасывается в ноль. В случае сэмпла воспроизведение сэмпла начинается заново с первого отсчёта этого сэмпла. |
| Частота воспроизведения сэмпла или волновой таблицы |  | **pp aa aa** | **pp** — предделитель частоты, **aa aa** — делитель частоты. Частота тактирования воспроизведения сэмпла вычисляется по формуле . Частота воспроизведения волновой таблицы в 256 раз меньше . |
| Включение изменения громкости по пересечению нуля |  |  | Команда применяется к паре каналов (пара каналов: 0 и 1) одновременно при исполнении команды для одного из этих каналов |
| Выключение изменения громкости по пересечению нуля |  |  | Команда применяется к паре каналов (пара каналов: 0 и 1) одновременно при исполнении команды для одного из этих каналов |
| Задать адрес точки зацикливания сэмпла во внутренней флэш-памяти |  | **ll ll ll** | **ll ll ll** — сдвиг точки зацикливания относительно стартового адреса сэмпла во флэш-памяти |
| Задать адрес точки зацикливания сэмпла в ОЗУ |  | **ll ll** | **ll ll** — сдвиг точки зацикливания относительно стартового адреса сэмпла в ОЗУ |
| Задать длину сэмпла во внутренней флэш-памяти |  | **ll ll ll** | **ll ll ll** — длина сэмпла во флэш-памяти |
| Задать длину сэмпла в ОЗУ |  | **ll ll** | **ll ll** — длина сэмпла в ОЗУ |
| Задать тип волны |  | **ww** | **ww** — тип волны, синтезируемой каналом:  0 — нет сигнала;  1 — волновая таблица или сэмпл;  2 — треугольная волна;  3 — сумма волновой таблицы или сэмпла и треугольной волны;  4 — шум;  5 — сумма волновой таблицы или сэмпла и шума;  6 — прямоугольная волна с настраиваемым коэффициентом заполнения (при помощи формирования волновой таблицы);  7 — пилообразная волна (при помощи формирования волновой таблицы). При использовании типов волн 3 и 5 возможно переполнение итогового значения, в этом случае отсчёты итогового сигнала вычисляются по модулю 4096. |
| Коэффициент заполнения для типа волны 6 |  | **dd** | **dd** —коэффициент заполнения. Реальный коэффициент заполнения вычисляется по формуле |
| Данные волновой таблицы |  | **[dd]** | **[dd]** —массив из 256 байтов, задающий волновую таблицу. Каждый байт соответствует одному отсчёту волновой таблицы. Массив данных в неизменном виде используется в качестве волновой таблицы. |
| Амплитуда треугольной волны или шума |  | **aa** | **aa** —амплитуда треугольной волны или шума, находится в диапазоне от 0 до 11. Амплитуда вычисляется по формуле где — максимально возможная для ЦАПа амплитуда выходного сигнала. |

Таблица А5

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Описание команды | Значение байта команды, — номер канала | Формат параметра(-ов) | Описание функций команды и параметра(-ов) |
| Установить битовую маску таймера |  | **bb** | **bb** — битовая маска воздействия таймеров на каналы. Если бит равен единице, то таймер воздействует на канал и сбрасывает его фазу. Если бит равен нулю, то воздействия на канал не происходит. Соответствие битов и каналов (от младшего бита к старшим): биты 0-3 — каналы 0-3 DDS/ШИМ, бит 4 — канал шума, биты 5-6 — каналы 0-1 ЦАПов. |
| Частота срабатывания таймера |  | **pp aa aa** | **pp** — предделитель частоты, **aa aa** — делитель частоты. Частота срабатывания таймера вычисляется по формуле . |
| Сброс фазы таймера |  |  |  |
| Включить таймер |  |  |  |
| Выключить таймер |  |  |  |

Таблица А6

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Описание команды | Значение байта команды | Формат параметра(-ов) | Описание функций команды и параметра(-ов) |
| Ждать до следующего срабатывания таймера исполнения команд |  |  |  |
| Установить частоту срабатывания таймера исполнения команд |  | **aa aa aa aa** | **aa aa aa aa** — делитель частоты. Частота срабатывания таймера вычисляется по формуле . |
| Установить точку зацикливания |  | **aa aa aa aa** | **aa aa aa aa** — абсолютный адрес во внешней флэш-памяти. При исполнении команды прерывается исполнение потока команд. Микроконтроллер переходит на этот адрес и начинает читать и исполнять команды. |
| Остановить исполнение команд |  |  |  |
| Ничего не делать |  |  | Микроконтроллер не изменяет никаких параметров синтеза и переходит к исполнению следующей команды. |

# Приложение Б. Формат пакетов обмена данными между микроконтроллером и ПК

Пакеты делятся на пакеты данных, передаваемые от ПК микроконтроллеру, и ответные пакеты, отправляемые микроконтроллером ПК.

Общий формат команд, передаваемых от ПК микроконтроллеру, представлен в Таблице Б1. Нумерация байтов начинается с единицы.

Числа, представление которых занимает несколько байтов, записаны младшим байтом вперёд, если не указано иное.

Таблица Б1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номер байта (или диапазон для группы байтов) | Размер (указывается для группы байтов) | Описание байта (группы байтов) |
| 1 |  | Байт синхронизации, всегда равен 6916 |
| 2-3 | 2 | Размер пакета минус один байт. Сначала идёт старший байт, а потом младший. |
| 4 |  | Код команды |
| 4-(4 + размер - 8) | размер - 8 | Данные. Эта часть пакета может отсутствовать. |
| (4 + размер - 7) |  | Проверочный байт, вычисляется как исключающее ИЛИ от всех предыдущих байтов |

Общий формат команд, передаваемых от микроконтроллера ПК, представлен в Таблице Б2. Нумерация байтов начинается с единицы.

Таблица Б2

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номер байта (или диапазон для группы байтов) | Размер (указывается для группы байтов) | Описание байта (группы байтов) |
| 1 |  | Байт синхронизации, всегда равен 6916 |
| 2 |  | Код пакета |
| 3 | 45 | Данные пакета |
| 48 |  | Проверочный байт, вычисляется как исключающее ИЛИ от всех предыдущих байтов |

Коды команд, передаваемых от ПК микроконтроллеру, представлены в Таблице Б3.

Таблица Б3

|  |  |
| --- | --- |
| Код команды | Описание команды |
| 0 | Загрузить данные пакета во внутреннюю флэш-память |
| 1 | Загрузить данные пакета во внутреннее ОЗУ |
| 2 | Загрузить данные пакета во внешнюю флэш-память |
| 3 | Начать исполнение потока команд |
| 4 | Закончить исполнение потока команд |

Коды пакетов, передаваемых от микроконтроллера ПК, представлены в Таблице Б4.

Таблица Б4

|  |  |
| --- | --- |
| Код пакета | Описание пакета |
| 0 | Начальный пакет: версия программы микроконтроллера, количество свободной памяти, размер внешней флэш-памяти и т.д. |
| 1 | Пакет с информацией о завершении записи данных во внутреннюю флэш-память |
| 2 | Пакет с информацией о завершении записи данных во внутреннее ОЗУ |
| 3 | Пакет с информацией о завершении записи данных во внешнюю флэш-память |
| 4 | Пакет с сообщением о неправильном значении проверочного байта |
| 5 | Пакет с сообщением о неизвестном коде принятой команды |

Команды, передаваемые от ПК микроконтроллеру и имеющие коды от 0 до 2, имеют общий формат данных. Формат представлен в Таблице Б5.

Таблица Б5

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номер байта (или диапазон для группы байтов) | Размер (указывается для группы байтов) | Описание байта (группы байтов) |
| 1-4 | 4 | 32-битное положительное число, начальное смещение данных пакета относительно начала области памяти, в которую он записывается. |
| 5-конец | (размер блока - 4) | Данные, которые записываются в соответствующую память |

Команды, передаваемые от ПК микроконтроллеру и имеющие коды от 3 до 4, не имеют блока данных. Таким образом, их общая длина составляет 5 байтов, а в поле размера указывается число 4.

Формат данных пакета, передаваемого от микроконтроллера ПК и имеющего код пакета 0, представлен в Таблице Б6.

Таблица Б6

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номер байта (или диапазон для группы байтов) | Размер (указывается для группы байтов) | Описание байта (группы байтов) |
| 1-4 | 4 | 32-битное положительное число, размер программы микроконтроллера, занимаемый ею во внутренней флэш-памяти |
| 5-8 | 4 | 32-битное положительное число, начальное смещение области памяти, отведённой под сэмплы, во внутренней флэш-памяти микроконтроллера |
| 9-12 | 4 | 32-битное положительное число, начальное смещение области памяти, отведённой под сэмплы, в ОЗУ микроконтроллера |
| 13-16 | 4 | 32-битное положительное число, максимальная поддерживаемая программой микроконтроллера версия файла (см. Приложение В) |
| 17-20 | 4 | 32-битное положительное число, версия программы микроконтроллера |
| 21-24 | 4 | 32-битное положительное число, размер (в байтах) внешней флэш-памяти |
| 25-32 | 8 | 64-битное положительное число, UID внешней флэш-памяти |
| 33 | 1 | Идентификатор производителя внешней флэш-памяти |
| 34-45 | 12 | Байты не используются. Игнорировать при чтении. |

Команды, передаваемые от микроконтроллера ПК и имеющие коды от 1 до 3, имеют общий формат данных. Формат представлен в Таблице Б5.

Таблица Б6

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Номер байта (или диапазон для группы байтов) | Размер (указывается для группы байтов) | Описание байта (группы байтов) |
| 1 |  | Проверочный байт пришедшего от ПК пакета данных |
| 2-5 | 4 | 32-битное положительное число, начальное смещение данных в пришедшем от ПК пакете данных |
| 6-7 | 2 | 16-битное положительное число, длина блока данных в пришедшем от ПК пакете данных |
| 8-45 | 38 | Байты не используются. Игнорировать при чтении. |

Пакеты, передаваемые от микроконтроллера ПК и имеющие коды от 4 до 5, не содержат полезной информации в блоке данных. Поэтому при чтении все 45 байтов блока данных игнорируются.

# Приложение В. Формат файла данных синтеза

Файл формируется модифицированной версией программы Furnace Tracker. В программу добавлена поддержка устройства: эмуляция генерации звука, возможность написания музыки для устройства и экспорт данных в файл [7].

Файл разбит на блоки и имеет бинарный формат. Все блоки следуют друг за другом в порядке, указанном в Таблице В1, без разделителей. Общий формат файла представлен в Таблице В1.

Поля данных, представляющие числа и занимающие более одного байта, записаны младшим байтом вперёд.

Таблица В1

|  |  |
| --- | --- |
| Название блока | Описание блока |
| Заголовок | Идентификатор файла, версия формата, общий размер файла |
| Блок сэмплов флэш-памяти | Данные сэмплов, которые располагаются во внутренней флэш-памяти микроконтроллера |
| Блок сэмплов ОЗУ | Данные сэмплов, которые располагаются в ОЗУ микроконтроллера |
| Блок потока команд | Последовательность команд изменения параметров синтеза |

Формат заголовка файла представлен в Таблице В2.

Таблица В2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Смещение от начала файла в байтах | Формат данных | Размер данных в байтах | Описание данных |
| 0 | ASCII-строка | 4 | Идентификатор формата файла: «CRAP». |
| 4 | 32-битное целое положительное число | 4 | Версия файла |
| 8 | 32-битное целое положительное число | 4 | Размер файла |

Формат блока сэмплов флэш-памяти представлен в Таблице В3.

Таблица В3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Смещение от начала блока в байтах | Формат данных | Размер данных в байтах | Описание данных |
| 0 | ASCII-строка | 13 | Идентификатор блока: «FLASH SAMPLES». |
| 13 | 32-битное целое положительное число | 4 | Размер данных (dsize) |
| 17 | Массив байтов | dsize | Данные сэмплов. Один непрерывный блок, который без изменений загружается во флэш-память микроконтроллера по адресу начального смещения блока |

Формат блока сэмплов ОЗУ представлен в Таблице В4.

Таблица В4

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Смещение от начала блока в байтах | Формат данных | Размер данных в байтах | Описание данных |
| 0 | ASCII-строка | 11 | Идентификатор блока: «RAM SAMPLES» |
| 11 | 32-битное целое положительное число | 4 | Размер данных (dsize) |
| 15 | Массив байтов | dsize | Данные сэмплов. Один непрерывный блок, который без изменений загружается в ОЗУ микроконтроллера по адресу начального смещения блока |

Формат блока потока команд представлен в Таблице В5.

Таблица В5

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Смещение от начала блока в байтах | Формат данных | Размер данных в байтах | Описание данных |
| 0 | ASCII-строка | 14 | Идентификатор блока: «REGISTERS DUMP» |
| 14 | 32-битное целое положительное число | 4 | Размер данных (dsize) |
| 18 | Массив байтов | dsize | Поток команд. Один непрерывный блок, который без изменений загружается микроконтроллером во внешнюю флэш-память, начиная с нулевого адреса |

Примечание: в начале потока команд первые четыре байта задают начальное значение делителя частоты для таймера исполнения команд.

# Список литературы

[1] Kroupa V. F. Direct Digital Frequency Synthesizers. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. — 383 pp.

[2] SoundOnSound: Synthesizing Strings: PWM & String Sounds. URL: <https://www.soundonsound.com/techniques/synthesizing-strings-pwm-string-sounds> (дата обращения: 07.11.2024).

[3] Synthesizer Basics. The musician's reference for creating, performing, and recording electronic music. Milwaukee, WI: H. Leonard Books, 1988. — 129 pp.

[4] Boulanger, Richard. The Audio Programming Book. / Richard Boulanger, Victor Lazzarini. — Cambridge: MIT Press, 2010. — 920 pp.

[5] Commodore 64 Programmer's Reference Guide. Wayne, Pennsylvania: Commodore Business Machines, Inc. URL: <http://cini.classiccmp.org//pdf/Commodore/C64%20Programmer's%20Reference%20Guide.pdf> (дата обращения: 13.11.2024).

[6] Analog Devices. LTC1063 - DC Accurate, Clock-Tunable 5th Order Butterworth Lowpass Filter. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1063fa.pdf> (дата обращения: 13.11.2024).

[7] GitHub. Furnace Tracker by tildearrow, fork by LTVA1, stm32crapsynth branch. URL: <https://github.com/LTVA1/furnace/tree/stm32crapsynth> (дата обращения: 19.11.2024).