

ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ДВОЙНОЙ БУФЕРИЗАЦИЕЙ НА ОСНОВЕ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОГО МОДУЛЯТОРА НА БАЗЕ RASPBERRY PI PICO

Доклад посвящен разработке цифроаналогового преобразователя на базе платы Raspberry Pi Pico. В работе рассмотрены вопросы по проектированию цифроаналогового преобразователя, управлению интерфейсом USB, обмену данными между интерфейсом USB и широтно-импульсным модулятором, а также программированию микроконтроллера RP2040.

Raspberry pi pico, интерфейс usb, цифроаналоговый преобразователь, широтно-импульсная модуляция, прямой доступ к памяти, фильтр нижних частот.

Timoshenko Danil Alexandrovich

DIGITAL-TO-ANALOG CONVERTER WITH DOUBLE BUFFERING BASED ON PULSE-WIDTH MODULATOR ON RASPBERRY PI PICO

The paper is devoted to the development of a digital-to-analog converter based on Raspberry Pi Pico. The paper deals with the design of digital-to-analog converter, USB interface control, data exchange between USB interface and pulse-width modulator, as well as programming of RP2040 microcontroller.

Raspberry pi pico, usb interface, digital to analog converter, pulse width modulation, direct memory access, lowpass filter.

Введение

Данная работа является частью проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB», выполняемого совместно с Передовой инженерной школой ЮФУ. Плата Raspberry Pi Pico выступает в роли USB-аудиоустройства, которое принимает цифровой сигнал и преобразует его в аналоговый сигнал, то есть работает как устройство вывода с интерфейсом USB.

На плате Raspberry Pi Pico отсутствует аппаратный цифроаналоговый преобразователь [1], поэтому решено использовать выход широтно-импульсного модулятора (ШИМ) для выполнения цифроаналогового преобразования [2].

Основная часть

Цифроаналоговый преобразователь реализован таким образом, что микроконтроллер RP2040, на котором основана плата Raspberry Pi Pico, по шине USB получает данные в формате PCM8 (8 бит) или PCM16 (16 бит) от персонального компьютера. С помощью контроллера DMA (*direct memory access* – прямой доступ к памяти) данные передаются через промежуточный буфер в широтно-импульсный модулятор, который генерирует ШИМ сигнал [3]. Этот сигнал с выбранного вывода платы поступает на вход аналогового ФНЧ для сглаживания. На рис. 1 изображена структурная схема ЦАП на основе ШИМ.

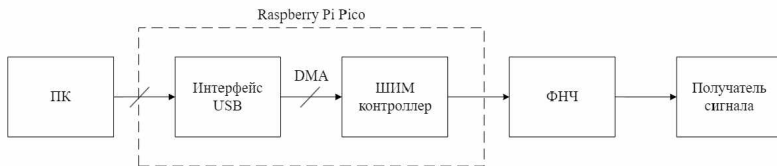


Рис. 1. Структурная схема ЦАП на основе ШИМ

Рассмотрим работу передачи данных от интерфейса USB до широтно-импульсного модулятора более подробно. На рис. 2 представлена схема, поясняющая работу буферов для передачи сигнала.

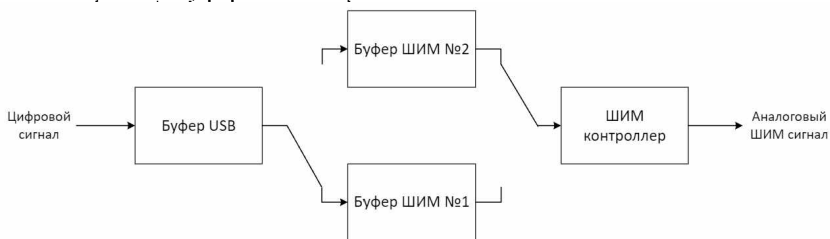


Рис. 2. Структурная схема передачи данных при двойной буферизации

Полученные данные от интерфейса USB хранятся в буфере USB. Далее данные передаются в буфер ШИМ №1, а в это время данные из буфера ШИМ №2 передаются в ШИМ контроллер, который их преобразует в аналоговый вид. Таким образом реализован двухсторонний буфер ШИМ для передачи данных от интерфейса USB до широтно-импульсного модулятора. В тот момент, когда заканчивается запись в один буфер и чтение из другого, буферы меняются местами (фактически происходит обмен указателями) и их работа дальше продолжается [4].

Передачей данных от последнего буфера ШИМ в широтно-импульсный модулятор занимается подсистема DMA. Структурная схема каналов DMA приведена на рис. 3.

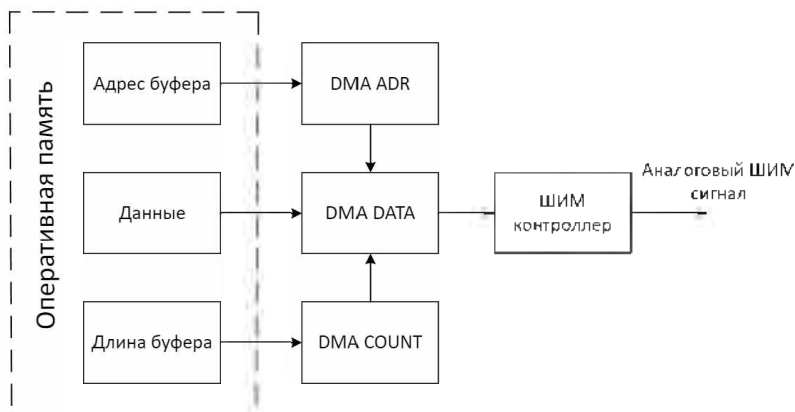


Рис. 3. Структурная схема работы DMA каналов

DMA – это отдельная подсистема микроконтроллера, которая необходима для передачи данных из одной области памяти в другую область памяти или на периферийное устройство без участия центрального процессора. Для работы DMA канала необходимо задать адрес памяти, по которому хранятся данные, количество передач и адрес, по которому нужно отправить данные. За передачу данных из буфера ШИМ в широтно-импульсный модулятор отвечает канал DMA DATA. Этот канал настраивают два других канала DMA ADR и DMA COUNT, которые в свою очередь передают адрес и количество передач (размер буфера ШИМ). Эти три канала DMA вызывают друг друга по цепочке непрерывно [5].

Микроконтроллер генерирует ШИМ сигнал следующим образом: происходит наращивание счётчика от 0 до 255, то есть реализован 8-битный ЦАП. Каждый такт микроконтроллера прибавляет единицу к значению счётчика. Пороговое значение задается равным отсчету РСМ8, полученному микроконтроллером по USB. При значении счётчика от 0 до порогового значения на выводе платы генерируется логическая единица (3.3 В), при значении счётчика выше порогового – логический ноль [3]. Временные диаграммы, поясняющие работу ШИМ на Raspberry Pi Pico, приведены на рис. 4.

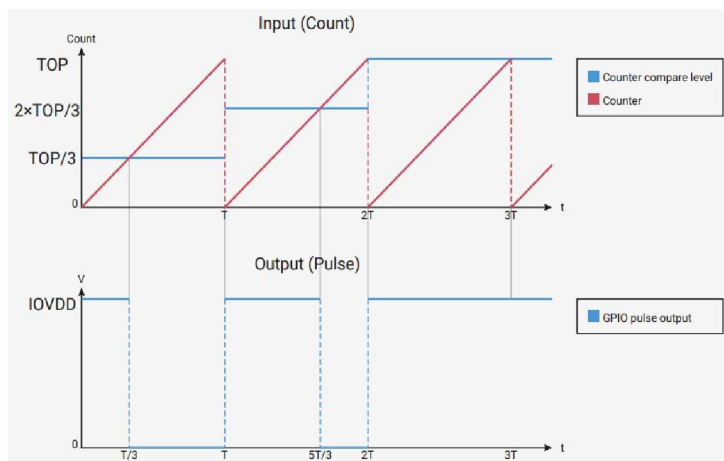


Рис. 4. Формирование ШИМ сигнала на Raspberry Pi Pico

После широтно-импульсного модулятора сигнал проходит через фильтр нижних частот. Сигнал на выходе ФНЧ представлен на рис. 5. ЦАП имеет следующие параметры: частота ШИМ 250 кГц, разрядность 8 бит, частота дискретизации сигнала 250 кГц, частота гармонического сигнала 1 кГц, частота среза фильтра также 1 кГц.

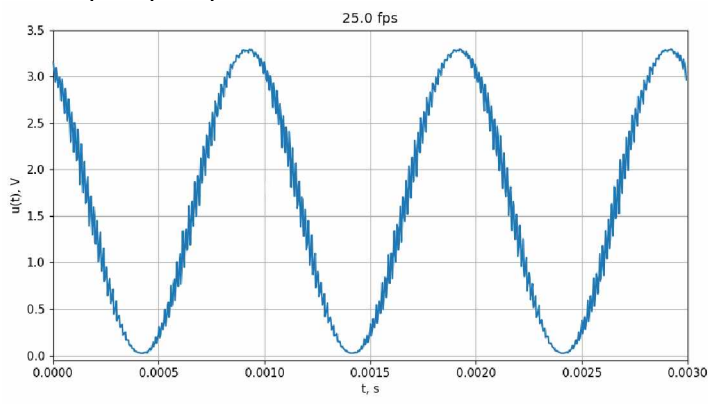


Рис. 5. Сигнал на выходе ФНЧ

На текущем этапе проекта разработка ЦАП ведется с применением ФНЧ 1-го порядка (RC-цепочка), поэтому частота среза занижена для лучшего сглаживания высокочастотных пульсаций.

Такой фильтр имеет один существенный недостаток. Крутизна спада в полосе подавления составляет всего лишь 20 дБ/декаду, то есть фильтр 1-го порядка не обеспечивает характеристик, необходимых при построении ЦАП с использованием ШИМ. Однако на этапе разработки программной части такой фильтр является наиболее удобным и простым решением [6].

Параллельно с разработкой ЦАП ведется разработка активного ФНЧ 8-го порядка с полосой пропускания 192 кГц и достаточно высокой прямоугольностью АЧХ.

Выводы

В результате проделанной работы была создана программа для микроконтроллера RP2040 платы Raspberry Pi Pico. Программа реализована на языке программирования C. Она позволяет принимать цифровые сигналы с персонального компьютера и преобразовывать их в аналоговые сигналы.

Таким образом, был реализован прототип подсистемы вывода сигналов для проекта «Блок ввода-вывода аналоговых сигналов с интерфейсом USB». Проект может быть полезен в образовательном процессе при обучении студентов программированию и цифровой обработке сигналов. Также данная технология будет полезна при разработке систем программно-определяемого радио, необходимыми элементами которых являются АЦП и ЦАП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технические характеристики платы Raspberry Pi Pico. <https://www.raspberrypi.com/> (дата обращения: 19.05.2024)
2. Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller. Application Report (SPRAA88A) <https://www.ti.com/lit/an/spraa88a/spraa88a.pdf?ts=1717230151734> (дата обращения: 19.05.2024)
3. RP2040 Datasheet A microcontroller by Raspberry Pi. <https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf> (дата обращения: 19.05.2024)
4. Разработка графического интерфейса с помощью библиотеки Qt3. https://opennet.ru/docs/RUS/qt3_prog/x2947.html (дата обращения: 21.05.2024)
5. *Raspberry Pi Pico. C/C++ SDK. Libraries and tools for C/C++ development on RP2040 microcontrollers.* <https://www.raspberrypi.com/> (дата обращения: 21.05.2024)

6. *Плютников Ю. В.* Использование выхода ШИМ как цифро-аналогового преобразователя / Ю. В. Плютников, Ю. С. Уймыш // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. — Екатеринбург: УрФУ, 2018. — С. 237-241.
7. *Кестер У.* Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / Уолт Кестер. – Москва: Техносфера, 2010. - 328 с.
8. *Кестер У.* Аналого-цифровое преобразование / Уолт Кестер. – Москва: Техносфера, 2007. - 1016 с.
9. *Лайонс Р.* Цифровая обработка сигналов/ Р.Лайонс – М.: Бином, 2007. – 652с.
10. Цифровая обработка сигналов. Многоскоростные системы. Лекция 16 апреля 2018 г. МФТИ.

Тимошенко Данил Александрович, студент кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления ЮФУ. Адрес: Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефоны: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 доб. 30109; +7 (8634) 68-08-90 доб. 30109 email: dant@sfded.ru

Timoshenko Danil Alexandrovich, student, Department of Theoretical Fundamentals of Radio Engineering, Institute of Radio Engineering Systems and Control, SFU. **Address:** Russia, Rostov region, 347922, Taganrog, Nekrasovsky per., 44, educational and laboratory building "D", auditorium D-110; Phones: +7 (8634) 37-16-32; +7 (863) 218-40-00 ext. 30109; +7 (8634) 68-08-90 ext. 30109 email: dant@sfded.ru