

Марьев Александр Александрович

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР
НА БАЗЕ ПЛАТЫ RASPBERRY PI PICO**

Рассмотрены основные задачи, возникающие при реализации функционального генератора на базе микроконтроллера. Предложена структура генератора, выбран метод синтеза колебаний, рассмотрены различные варианты реализации цифроаналогового преобразования. Приведены результаты экспериментов, проведенных с макетом функционального генератора, предложены пути дополнительного улучшения формы колебаний.

Функциональный генератор, прямой цифровой синтез, табличный синтез, цифроаналоговое преобразование, широтно-импульсная модуляция, дельта-сигма модуляция.

Maryev Alexander Alexandrovich

FUNCTION GENERATOR BASED ON RASPBERRY PI PICO

The common problems related to the implementation of a function generator based on a microcontroller are considered. The structure of the generator is proposed, the method of synthesis is chosen, and several implementations of digital-to-analog conversion are considered. The results of experiments made with a function generator prototype are presented, and some ways to further waveform improvement are proposed.

Function -width-modulation, delta generator, direct digital synthesis, wavetable synthesis, digital-to-analog conversion, pulse -sigma modulation.

Введение

Функциональный генератор предназначен для формирования измерительных радиотехнических сигналов и является одним из устройств, незаменимых при проведении измерений характеристик инфокоммуникационных устройств.

На рынке представлено достаточное количество лабораторных функциональных генераторов, удовлетворяющих запросы большинства пользователей, однако в ряде случаев применение лабораторных приборов невозможно или затруднительно. К таким ситуациям относятся, например:

- измерение характеристик устройств, размещенных на подвижных малогабаритных платформах;
- измерения, требующие использования большого количества функциональных генераторов;
- самостоятельная работа студентов, выполняемая вне лабораторий.

В подобных случаях возникает необходимость в применении недорогих малогабаритных функциональных генераторов, требования к которым могут быть снижены, по сравнению с настольными лабораторными приборами.

Выбор вычислительной платформы

Для разработки функционального генератора была выбрана плата Raspberry Pi Pico [1] на основе 32-разрядного микроконтроллера RP2040, основанного на архитектуре ARM Cortex-M0+ [2]. Это устройство, сочетающее вычислительную производительность и энергоэффективность с низкой стоимостью.

Микроконтроллер RP2040 поддерживает набор команд ARMv6-M Thumb-2 [3], содержит два вычислительных ядра с тактовой частотой 125 МГц, повышаемой до 200...240 МГц, и выполняет основные действия над целыми 32-разрядными числами за 1 такт. Объем оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) составляет 264 кбайт с возможностью произвольного чтения и записи за 2 такта (центральный процессор) и последовательного чтения или записи до 4 байт за 1 такт (контроллер прямого доступа к памяти).

Невысокая стоимость (менее 1 тыс. руб. по состоянию на начало 2024 г.) и возможность программирования на языках высокого уровня (C, C++, Python) в сочетании с перечисленными характеристиками определили выбор вычислительной платформы.

Структура генератора

Функциональный генератор использует метод прямого цифрового синтеза (direct digital synthesis, DDS) [4]. На рис. 1 приведена структурная схема генератора.

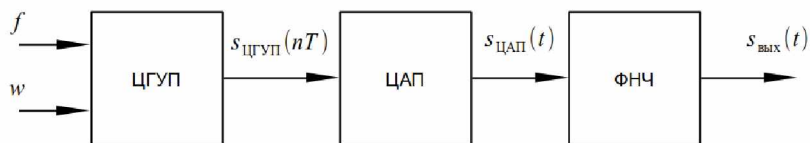


Рис. 1. Структурная схема функционального генератора

Параметры f и w задают соответственно частоту и форму колебания, формируемого цифровым генератором, управляемым программно (ЦГУП). Полученные на его выходе отсчеты цифрового колебания $s_{\text{ЦГУП}}(nT)$ направляются на вход цифроаналогового преобразователя (ЦАП) и далее на фильтр нижних частот (ФНЧ).

Выбор метода синтеза колебаний

Большой объем ОЗУ и быстрый доступ к нему позволяют реализовать высокопроизводительный табличный синтезатор колебаний [5].

Высокая разрядность микроконтроллера (32 бит) позволяет использовать 32-разрядный аккумулятор фазы, что обеспечит малую величину шага сетки частот генератора.

Благодаря поддержке эмуляции вычислений с плавающей запятой нет необходимости хранить таблицы для всех форм сигналов в памяти программ – таблица для формирования колебания нужной формы может формироваться непосредственно перед запуском генератора.

Выбор метода цифроаналогового преобразования

Плата Raspberry Pi Pico не содержит встроенного ЦАП, однако он может быть реализован на основе встроенного широтно-импульсного модулятора (ШИМ). При этом не требуются дополнительных аппаратных компонентов, число используемых выводов платы (один) не зависит от разрядности ЦАП, которая равна разрядности счетчика ШИМ.

Благодаря своей схемотехнической простоте ЦАП на основе ШИМ является распространенным техническим решением, несмотря на известные ограничения по быстродействию и уровню искажений сигнала [6].

Практический интерес представляют реализации ЦАП с эффективной разрядностью не ниже 8 бит, поэтому при реализации ЦАП на основе ШИМ требуется использование 8-разрядного счетчика. При этом период ШИМ составляет 256 периодов тактовой частоты процессора, следовательно, частота дискретизации ЦАП на основе ШИМ не может быть выше 500... 750 кГц (при тактовой частоте процессора 128... 192 МГц).

Учитывая особенности спектра ШИМ-сигнала [7], это предъявляет повышенные требования к прямоугольности АЧХ аналогового ФНЧ. Другим важным ограничением является невозможность формирования гармонических колебаний с частотами выше 250...375 кГц (половина частоты дискретизации). Для колебаний сложной формы это ограничение усиливается: возможно формирование колебаний с частотой до $(250...375)/M$ кГц (где M – число гармоник формируемого колебания, которые должны уместиться в полосу до половины частоты дискретизации).

Повышение частоты ШИМ требует пропорционального понижения разрядности счетчика, что неизбежно приведет к повышению уровня шума квантования. Для получения приемлемого уровня искажений сигнала может быть использован программный Δ - Σ модулятор [8], который обеспечит вытеснение спектра шума квантования из полосы формируемого колебания в область верхних частот, подавляемых аналоговым ФНЧ, к которому подключен ЦАП.

При реализации ЦАП с Δ - Σ модулятором и ШИМ возникает ряд взаимно противоречивых ограничений:

- для повышения максимальной частоты формируемого сигнала необходимо увеличение частоты дискретизации;

- для увеличения частоты дискретизации требуется снижение разрядности счетчика ШИМ (то есть снижение разрядности ЦАП), что приведет к росту уровня шума квантования;

- для снижения уровня шума квантования в полосе сигнала требуется применение Δ - Σ модуляции, которая эффективна лишь при достаточно высоком отношении частоты дискретизации к частоте формируемого колебания, что при заданной частоте дискретизации приводит к требованию понижения максимальной частоты формируемых колебаний;

- другой путь сохранения низкого уровня шума квантования при понижении разрядности ЦАП – это повышение порядка Δ - Σ модулятора, что приводит к увеличению вычислительных затрат и, следовательно, к понижению максимальной реализуемой частоты дискретизации.

Выбор типа ФНЧ

Функциональный генератор должен иметь достаточно низкое выходное сопротивление (десятки или сотни Ом). При реализации ЦАП на основе ШИМ выходное сопротивление ЦАП оказывается невысоким (десятки Ом), поэтому допустимо использование как активного, так и пассивного ФНЧ. На настоящем этапе используется пассивный ФНЧ

Баггерворта 5-го порядка, поскольку его проектирование, сборка и наладка более просты [9], по сравнению с активными фильтрами того же порядка на операционных усилителях [10].

Результаты экспериментов

Прототип функционального генератора был собран на безопасной макетной плате, граничная частота ФНЧ была выбрана равной 500 кГц, частота ШИМ 6 МГц, разрядность ЦАП 5 бит. Частота формируемого колебания задана равной 1 кГц.

Для наблюдения формы выходного колебания использовался цифровой осциллограф Agilent MSO6104A с полосой 1 ГГц. Для исследования спектра формируемого колебания использовался анализатор спектра Instek GSP-7730 с полосой 3 ГГц.

На рис. 2 показаны форма сигнала и оценка его спектральной плотности мощности в полосе до 3 МГц (половина частоты дискретизации) при использовании ЦАП на основе ШИМ.

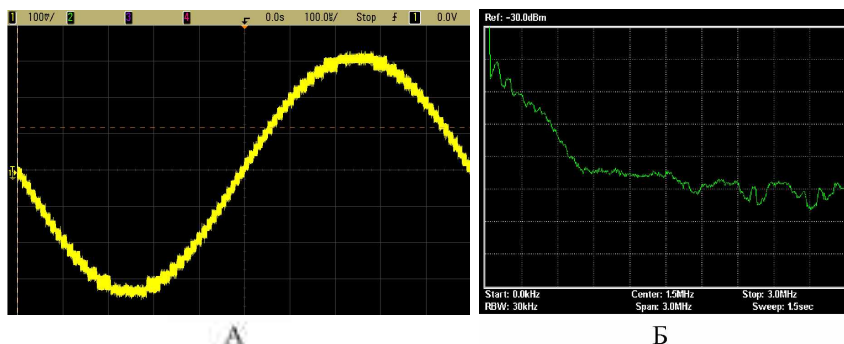


Рис. 2. Сигнал на выходе генератора с ЦАП на основе ШИМ (А) и его спектральная плотность мощности (Б)

На осциллограмме различимы ступенчатые изменения сигнала, обусловленные низкой разрядностью. В спектре различимы шумовые составляющие в полосе до 500 кГц с уровнем до -10 дБм. Для улучшения формы сигнала была реализована Δ - Σ модуляция 2-го порядка. Осциллограмма и оценка спектра полученного сигнала в полосе до 3 МГц приведены на рис. 3.

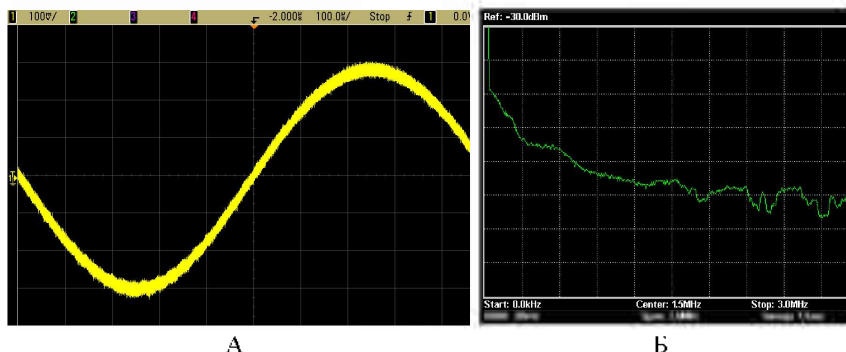


Рис. 3. Сигнал на выходе генератора с ЦАП на основе ШИМ с Δ - Σ модулятором 2-го порядка (А) и его спектральная плотность мощности (Б)

Применение Δ - Σ модуляции исключило ступенчатые изменения выходного сигнала, уровень шума в полосе пропускания ФНЧ (до 500 кГц) уменьшен на 10-15 дБ, что является существенным улучшением.

Выводы

На базе платы Raspberry Pi Pico реализован функциональный генератор с возможностью выбора формы и частоты колебания. Проведен эксперимент по исследованию формы колебания и его спектра для случая синусоиды с частотой 1 кГц. Применение ЦАП с двукратной модуляцией (сначала Δ - Σ , затем широтно-импульсная) позволило существенно уменьшить уровень шума квантования в полосе сигнала.

Дополнительное увеличение отношения сигнал/шум возможно за счет увеличения прямоугольности АЧХ ФНЧ, а также за счет отказа от ШИМ и применения ЦАП лестничного типа.

Проект реализуется победителем грантового конкурса для преподавателей 2023/2024 Стипендиальной программы Владимира Потанина.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Raspberry Pi Pico Datasheet*. Режим доступа: <https://datasheets.raspberrypi.com/pico/pico-datasheet.pdf> (дата обращения 30.05.2024)
2. *Joseph Yiu. The Definitive Guide to ARM Cortex-M0 and Cortex-M0+ Processors*. Second edition Elsevier Inc. – 2015, 743 p.

3. ARMv6-M Architecture Reference Manual. Режим доступа: https://github.com/hyf6661669/ARM_documents/blob/main/ARMv6-M%20Architecture%20Reference%20Manual.pdf (дата обращения: 30.05.2024 г.)
4. *Vankka, Jouko.* (2000). Direct Digital Synthesizers: Theory, Design and Applications. 951-22-5232-5.
5. *Bristow-Johnson, Robert.* (1996). Wavetable Synthesis 101, A Fundamental Perspective.
6. *Куряев И.* Проектирование высокопроизводительных ЦАП с ШИМ для промышленных приложений // Электронные компоненты и технологии №3, 2021 – С.64-68
7. *Марьев А.А.* О выборе параметров широтно-импульсной модуляции для цифроаналогового преобразования // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении «КомТех-2023»: материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием: в 2 т. / Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2023. том 2 // С.83-89
8. *Schreier, Richard & Pavan, Shanthy & Temes, Gabor.* (2017). Understanding Delta-Sigma Data Converters. 10.1002/9781119258308.
9. *Кауфман М., Сидман А.Г.* Практическое руководство по расчетам схем в электронике: справ. в 2 т. Т.2: пер. с англ./под ред. Ф.Н. Покровского. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 288 с.: ил.
10. *Тутце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.

Марьев Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, Россия, Ростовская область, 347922, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, учебно-лабораторный корпус "Д", аудитория Д-110; Телефон: +7 (8634) 37-16-32, email: aamarev@sfedu.ru.

Maryev Alexandr Alexandrovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, Department of fundamentals of Radioengineering, Southern Federal University, 347922, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovsky lane, phone: +7 (8634) 37-16-32, email: aamarev@sfedu.ru.