

УДК 621.396

А.С. КРАВЧУК, В.И. МАНАЕНКОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

## РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ГЕНЕРАТОРА СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗА

Рассмотрены теоретические основы технологии прямого цифрового синтеза стандартных сигналов. Описан лабораторный макет функционального генератора, позволяющий генерировать три вида специальных сигналов. Получены технические характеристики генератора: диапазон частот 10 Гц...10 МГц, амплитуда сигнала 0,1...2 В, погрешность установки частоты  $\pm 0,1\text{Hz} + 100\text{ppm} \cdot F_c$ , шаг перестройки по частоте 0,1 Гц. Обеспечена высокая стабильность генерируемого сигнала, как на низких, так и на высоких частотах. Установлено, что скорость перестройки по частоте составляет 45 мкс, что подтверждает высокое быстродействие разработанного устройства.

**детерминированный сигнал, функциональный генератор, прямой цифровой синтез, генератор стандартных сигналов, частота, дискретизация, аккумулятор фазы, микроконтроллерное управление**

### Введение

Функциональный генератор (ФГ) – это источник напряжения, на выходе которого можно получить специальные аналоговые сигналы синусоидальной, прямоугольной и треугольной формы. ФГ является важным звеном радиоэлектронных средств, без которого сложно представить лабораторию современного ВУЗа. ФГ, предлагаемые большинством производителей, являются дорогостоящими изделиями [1].

К сожалению, в настоящее время ВУЗы продолжают использовать устаревшие устройства, которые за много лет эксплуатации утратили свои первоначальные технические характеристики и морально устарели, например, генератор стандартных сигналов (ГСС) типа Г4-18А, выпущенный в 70-х гг. Основным недостатком такого прибора является низкая стабильность, как по частоте, так и по амплитуде генерируемого сигнала, кроме того, в основном, приборы, выпущенные до 90-х годов, не перекрывают весь диапазон необходимых частот и зачастую в лабораториях приходится использовать несколько генераторов, например генератор нижних частот (ГНЧ) ГЗ-33, и генератор высоких частот (ГВЧ)

Г4-18А. В таких условиях, выполнение лабораторных работ по большинству курсов радиотехнических дисциплин становится затруднительным.

Поэтому в статье изложены основные подходы к созданию альтернативного генератора, который стал бы заменой устаревшим. Лабораторный генератор должен обладать следующими техническими характеристиками: диапазон частот 10 Гц...10 МГц, амплитуда выходного сигнала не ниже 2 В, иметь высокую стабильность работы.

### 1. Краткий обзор технологий синтеза сигналов

В настоящее время промышленно выпускаются микросхемы, в которых реализованы полнофункциональные генераторы, например MAX038, AD9854, AD9833 [2, 3].

Существует ряд устройств, представляющих собой интегральные микросхемы, которые позволяют генерировать сигналы определенной формы (синусоидальной, треугольной и прямоугольной). Такие микросхемы-генераторы отличаются по технологиям синтеза сигнала и техническим характеристикам (быстродействие, частотное разрешение, диапазон

частот, потребляемая мощность). Основными технологиями синтеза сигналов являются: прямого аналогового синтеза (ПАС), косвенного синтеза на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), прямого цифрового (ПЦС) и гибридного синтеза.

Технология ПАС предусматривает получение требуемой частоты генерируемого сигнала посредством аналоговых операций над частотой опорного генератора: операции деления и умножения, фильтрации. Технология ФАПЧ предусматривает получение требуемой частоты генерируемого сигнала с помощью дополнительного генератора, который охвачен обратной связью фазовой автоподстройки. В технологии ПЦС частота генерируемого сигнала определяется цифровыми методами.

Наиболее простым способом решения поставленной задачи является использования технологии прямого цифрового синтеза. Еще несколько лет назад микросхемы на основе ПЦС имели узкую область применения, а их использование сдерживалось сложностью реализации, ценой, а также недостаточным широким диапазоном рабочих частот.

В настоящее время компания Analog Devices выпускает интегральные синтезаторы ПЦС, которые имеют широкий спектр технических параметров [3]. Для построения ФГ на основе этих синтезаторов требуется внешний источник тактовой частоты, фильтр нижних частот (ФНЧ) и усилитель.

Рассмотрим теоретические основы синтеза сигналов на основе технологии ПЦС.

## 2. Основные преимущества технологии прямого цифрового синтеза

Устройства, разработанные с использованием технологии ПЦС, уникальны тем, что генерируемый ими сигнал синтезируется со свойственной цифровым системам точностью.

Частотное разрешение устройств ПЦС составляет сотые, и даже тысячные доли герца. Такое разрешение недостижимо для других методов синтеза.

Иной характерной особенностью технологии ПЦС является быстрая перестройка по частоте, по фазе и быстрый переход на новую форму сигнала. Например, в методе ФАПЧ используются цепи обратной связи и фильтрация сигнала ошибки, что существенно замедляет процесс перестройки. Для ПЦС скорость перестройки ограничивается быстродействием управляющего интерфейса, а также частотой тактовых колебаний, причем перестройка по частоте происходит без разрыва фазы.

Функциональная схема ПЦС представлена на рис. 1. Для того чтобы получить синусоидальный сигнал на выходе ЦАП, на его вход следует подать последовательность дискретных отсчетов функции синус. ПЦС формирует на выходе ЦАП дискретные отсчеты амплитуды заданной функции с частотой задающего генератора. Значения мгновенных амплитуд заданной функции табулированы. Обращение к конкретным значениям таблицы производится с помощью двоичного кода, который подается на адресные входы постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), а выходной код ПЗУ равен значению функции синус. Для получения линейно изменяющейся фазы используется аккумулятор фазы (АФ).

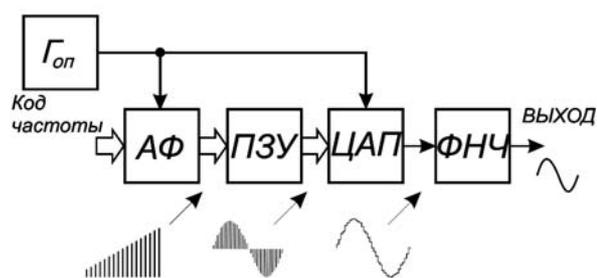


Рис. 1. Функциональная схема устройства на основе прямого цифрового синтеза

АФ по принципу работы представляет собой накапливающий сумматор [4, 5]. В каждом такте своей работы к его значению прибавляется некоторая постоянная добавка. Значение в АФ увеличивается линейно. Выходной код АФ представляет собой код мгновенной фазы выходного сигнала. Постоянная добавка, которая используется при работе накопи-

вающего сумматора, является приращением фазы за один такт работы устройства. Таким образом, чем быстрее изменяется фаза во времени, тем больше частота генерируемого сигнала. В свою очередь, скорость изменения фазы задается кодом частоты. Таким образом, применение АФ позволяет уменьшить шаг перестройки по частоте. Частота генерируемого сигнала определяется по формуле:

$$F_{out} = \frac{F_c \cdot MCLK}{2^N}, \quad (1)$$

где  $F_{out}$  – частота генерируемого сигнала;

$F_c$  – код частоты;

$MCLK$  – тактовая частота;

$N$  – разрядность аккумулятора фазы.

Величины тактовой частоты и разрядности аккумулятора фазы являются постоянными, следовательно, и шаг перестройки по частоте будет постоянным. Величина шага перестройки будет определяться по следующей формуле:

$$\Delta F = \frac{MCLK}{2^N}. \quad (2)$$

Из соотношения (2) следует, что из увеличения разрядности накапливающего сумматора  $N$  следует уменьшение шага перестройки по частоте. Например, если разрядность фазового аккумулятора составляет 28 бит, а тактовая частота 25 МГц, величина шага перестройки по частоте составит 0, Гц.

Интеграция в одном корпусе многофункционального прибора ПЦС, включающего быстродействующий ЦАП, позволяет создать устройства, которые по своим характеристикам превосходят быстродействующий ФАПЧ, а так же другие устройства по технологии синтеза сигнала [6, 7].

### 3. Разработка лабораторного макета функционального генератора

Основой лабораторного макета является микросхема ПЦС AD9833, имеющая следующие характеристики: мощность потребления 20 мВт при напряжении питания 3 В, номинально допустимое напря-

жение питания от 2,3 до 5В, амплитуда выходного сигнала 0,65 В, тактовая частота не более 25 МГц, диапазон генерируемых частот от 0,1 Гц до 12,5 МГц, разрядность фазового аккумулятора 28 бит, разрешение по частоте 0,1 Гц, виды генерируемого сигнала – синусоидальный, треугольный и прямоугольный. Управление формой, частотой и фазой сигнала ПЦС осуществляется посредством последовательного интерфейса SPI, с помощью 16-ти битного управляющего регистра.

Функциональная схема макета (рис. 2) содержит микросхему ПЦС, ФНЧ, операционный усилитель (ОУ), микроконтроллер ADUC812, жидкокристаллический индикатор (ЖКИ) и клавиатуру. В качестве тактового генератора, используется задающий генератор КХО-210 фирмы GAYER, с частотой 25 МГц и стабильностью частоты  $\pm 0,1 \text{ Hz} + 100 \text{ ppm} \cdot F_c$ .

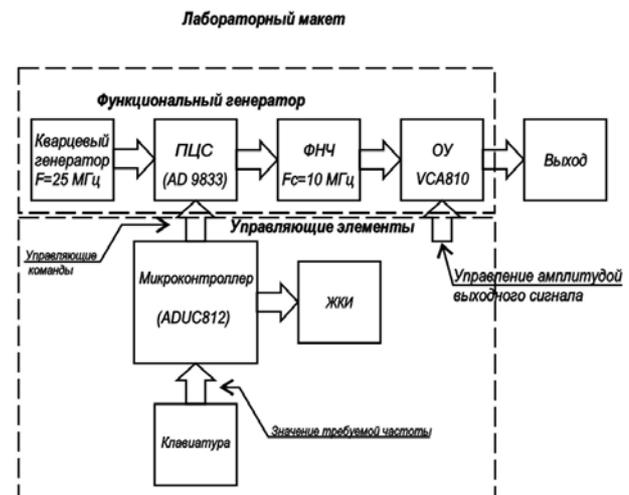


Рис. 2. Схема лабораторного макета

ФНЧ необходим для устранения высокочастотных составляющих спектра дискретного сигнала и алейзингового эффекта. Частота среза ФНЧ составляет 10 МГц. Для регулировки амплитуды выходного сигнала применяется управляемый напряжением операционный усилитель VCA-810 компании Texas Instruments, позволяющий изменять амплитуду выходного напряжения в диапазоне от -40 дБ до 40 дБ. Управление ФГ осуществляется при помощи микроконтроллера ADUC812 компании Analog Devices,

который позволяет управлять ФГ в ручном режиме при помощи клавиатуры и ЖКИ, либо в автоматическом режиме через последовательный порт компьютера RS-232.

Для того чтобы описать процессы, позволяющие производить управление генератором, следует рассмотреть алгоритм, согласно с которым работает программное обеспечение микроконтроллера (рис. 3).



Рис. 3. Алгоритм работы программного обеспечения микроконтроллера

С момента подачи напряжения питания на микроконтроллер происходит инициализация портов микроконтроллера, разрешение прерываний, запуск таймеров и отправка инициализирующих кодов в ПЦС. После выполнения действия инициализации на выходе ПЦС будет сформирован синусоидальный сигнал с частотой 100 кГц.

Алгоритм работы микроконтроллера представляет собой бесконечный цикл, в котором выполняется последовательный опрос клавиатуры и последовательного компьютерного порта. В случае прихода новой команды микроконтроллер формирует 16-битные управляющие команды, рассчитывает код фазы и частоты согласно формуле (1). Выполняет структурирование сформированных команд и осуществляет отправку данных в микросхему ПЦС,

обновляет данные на ЖКИ.

Применение микроконтроллера позволяет расширить функциональное назначение прибора, например, использовать генератор как блок более сложного стенда для измерения амплитудно-частотных характеристик (АЧХ). Поскольку микросхема ПЦС не требует больших вычислительных и временных ресурсов от микроконтроллера, на его базе возможно реализовать дополнительные лабораторные приборы, такие как частотомер, вольтметр и т.д.

Несмотря на сложность описанной структуры, само по себе устройство очень компактно. На рис. 4 приведена фотография платы ФГ, содержащая микросхему ПЦС, генератор тактовой частоты и ФНЧ.

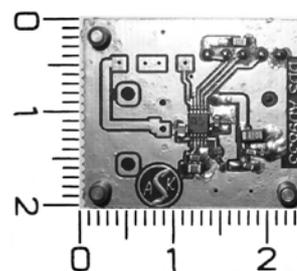


Рис. 4. Печатная плата функционального генератора

Напряжение питания микросхемы-генератора и микроконтроллера составляет 5 В. Общая потребляемая мощность 80 мВт.

#### 4. Испытания лабораторного макета функционального генератора

Снимки осциллограмм генерируемых сигналов приведены на рис. 5.

Установлено, что диапазон частоты формируемых сигналов составляет 10 Гц... 10 МГц. Амплитуды выходного сигнала микросхемы ПЦС в режимах синтеза синусоидального и треугольного сигнала равна 0,60 В. Однако, в режиме генерации прямоугольного сигнала амплитуда импульса соответствовала уровню напряжения питания микросхемы 5 В. Это связано с иным принципом синтеза сигнала типа меандр. Однако, в процессе перестройки по частоте наблюдалась паразитная амплитудная модуляция ( $\pm 0,05$  В), связанная с усечением кода ЦАП.

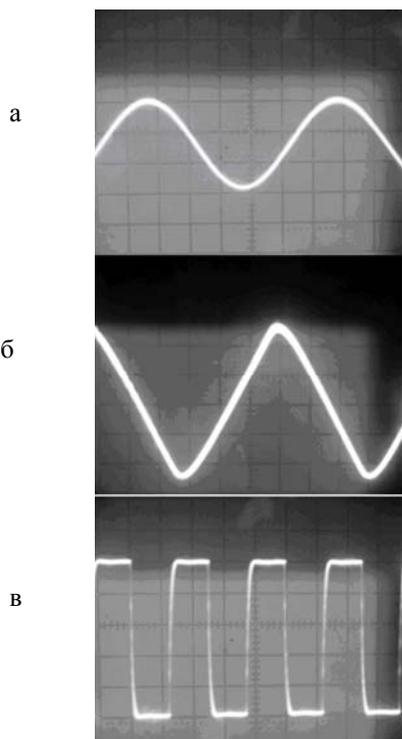


Рис. 5. Синусоидальный сигнал:  
а – синусоидальный сигнал;  
б – треугольный сигнал;  
в – сигнал типа меандр

В целом функциональный генератор на базе ПЦС удовлетворяет требованиям, предъявляемым к лабораторным генераторам. Особенно хочется отметить высокую стабильность генерируемых частот, которая определяется стабильностью частоты задающего генератора. В аналоговых приборах, используемых в лабораториях, такая стабильность как 100 ppm является запредельной величиной. При необходимости возможно использование внешнего более стабильного источника тактовой частоты, например, опорного генератора промышленного частотомера.

### Заключение

Разработка функционального генератора проведена с использованием технологии ПЦС, поскольку она является более простой и функциональной.

Разработанный лабораторный макет функционального генератора может генерировать сигналы требуемой формы: синусоидальный, треугольный и сигнал типа меандр. Технические характеристики генератора таковы: диапазон частот от 10 Гц...10

МГц, шаг перестройки 0,1 Гц, погрешность установки частоты  $\pm 0,1\text{Hz} + 100\text{ppm} \cdot F_c$ .

При использовании более дешевых компонентов можно добиться существенного снижения себестоимости на конечное изделие ФГ. Например, построение ФГ на следующих компонентах: микроконтроллер AT89C51, энкодер вместо клавиатуры и менее дорогой операционный усилитель позволит снизить себестоимость этого изделия.

### Литература

1. Официальный сайт компании АСТЭНА, прайс-лист [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.astena.ru/pr\\_7.html](http://www.astena.ru/pr_7.html) (3.12.2007).
2. Официальный сайт компании MAXIM [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.maxim-ic.com> (3.12.2007).
3. Официальный сайт компании Analog Devices, таблица выбора микросхем ПЦС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.analog.com/IST/SelectionTable/?selection\\_table\\_id=27](http://www.analog.com/IST/SelectionTable/?selection_table_id=27) (3.12.2007).
4. Ридико Л.И. DDS: прямой цифровой синтез частоты. – «Профессиональный портал по электронике» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.caxapa.ru/faq/MyDDS.pdf> (3.12.2007).
5. Мёрфи Е., Слэттери К. Все о синтезаторах DDS. – Компания Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://analog.com.ru/Public/DDSSYNTH.pdf> (3.12.2007).
6. Инструкция к микросхеме AD9833. – Компания Analog Devices [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.analog.com> (3.12.2007).
7. Стариков О. Прямой цифровой синтез частоты и его применение. – «Инженерная практика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru3ga.qrz.ru/UZLY/dds.htm> (3.12.2007).

Поступила в редакцию 21.11.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.И. Картунов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.