

# ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА INTEGRATED RADIOELECTRONIC DEVICES

УДК 681.325.36

## Особенности проектирования многоканального прецизионного генератора аналоговых сигналов

*Н.О. Крыликов, М.Л. Плавич*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»*

## Specific Features of Designing Precision Generator of Analog Signals

*N.O. Krylikov, M.L. Plavich*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow*

Рассмотрены особенности проектирования 12-канального 24-битного генератора аналоговых сигналов, предназначенного для исследований и испытаний сложной радиоэлектронной аппаратуры. Представлены структурные схемы устройства и его составных частей. Приведены экспериментально полученные характеристики изделия.

*Ключевые слова:* генератор; сигналы; волоконно-оптическая линия связи; ПЛИС; ЦАП; АЦП.

Some specific features of the 12-channel 24-bit analog signal generator design have been considered. The structural circuits of the device and of its components have been presented. The experimentally obtained characteristics of the item have been given.

*Keywords:* generator; signals; fiber optics; FPGA; DAC; ADC.

**Введение.** Для проведения исследований и испытаний сложных радиоэлектронных устройств и систем, в том числе специального назначения [1, 2], необходимо нестандартное стендовое оборудование. Многоканальный генератор аналоговых сигналов является уникальным электронным прибором среди коммерчески доступного контрольно-измерительного оборудования и может использоваться как при проведении исследований и испытаний различной электронной аппаратуры в качестве имитатора входных сигналов, так и при построении стендов полунатурного моделирования. Устройство отличается малой величиной минимального выходного напряжения (доли микровольта) при максимальной величине 10 В, имеет большое число выходных каналов, что предъявляет к нему серьезные схемотехнические и конструктивные требования.

---

© Н.О. Крыликов, М.Л. Плавич, 2015

**Разработка генератора.** Основная трудность при создании данного генератора помимо обеспечения требуемых точностных и динамических характеристик – необходимость достижения максимальной помехозащищенности выходных сигналов от шумов собственных цифровых схем и схем вторичного питания, помех от управляющего персонального компьютера (ПК), а также от взаимных наводок выходных каналов.

Особенностью разработки многоканального прецизионного генератора аналоговых сигналов является использование волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) между ПК и устройством. Высокие технические характеристики изделия достигнуты благодаря применению современной доступной элементной базы иностранного производства, что вполне допустимо при создании стендового и вспомогательного технологического оборудования.

Основные заданные технические характеристики генератора:

Число каналов.....	до 12
Диапазон выходного напряжения .....	$\pm 10$ В
Разрядность ЦАП.....	20 бит
Время установки ЦАП.....	1 мкс
Разрядность аттенюатора .....	4 бита
Время установки выходного напряжения .....	2 мкс
Общий динамический диапазон .....	144 дБ
Погрешность установки нуля на выходе .....	не хуже 0,0002 %
Длина линии связи .....	не менее 1,5 м
Габаритные размеры основного блока.....	420 x 290 x 42 мм
Масса.....	не более 3 кг

Управление генератором в реальном времени осуществляется с помощью ПК. Для организации интерфейса между ВОЛС и ПК разработана специальная карта расширения для шины PCI express (PCI-E) ПК, структурная схема которой представлена на рис.1.

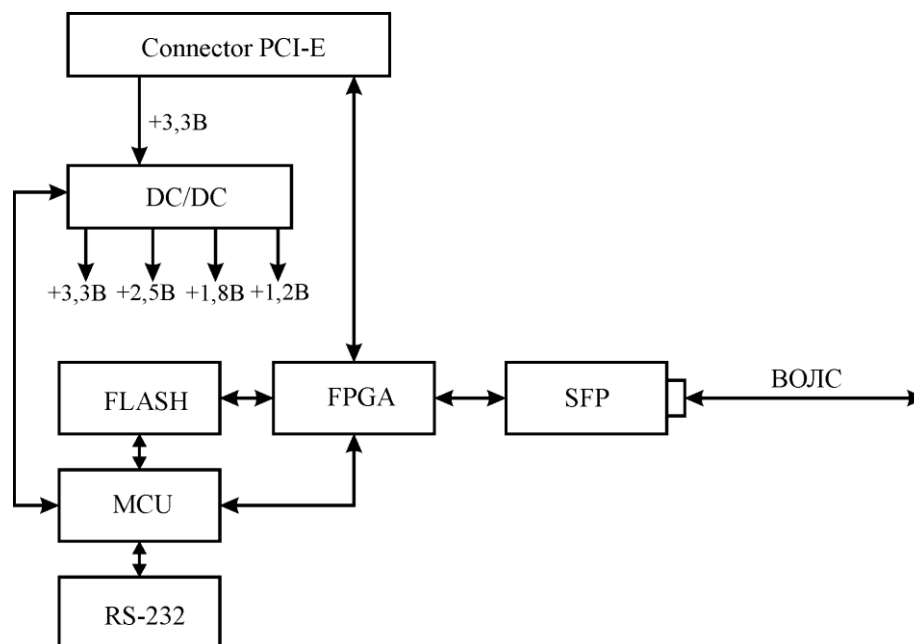


Рис.1. Структурная схема карты расширения PCI express

В состав карты PCI-E входят следующие основные блоки: источник питания (DC/DC), программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС) FPGA серии Spartan 6 XC6SLX45T компании Xilinx, имеющая встроенный последовательный трансивер [3, 4], загрузочная память FLASH для FPGA, микроконтроллер MCU, выполняющий контроль напряжений питания схемы, контроль и управление загрузкой FPGA. В качестве SFP (Small Form Factor Pluggable) трансивера используется модуль FTLF8519P3BTL компании Finisar [5]. Модуль позволяет обеспечить двунаправленный обмен данными со скоростью до 2,125 Гб/с.

Структура основного конструктивного блока изделия – блока цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) представлена на рис.2.

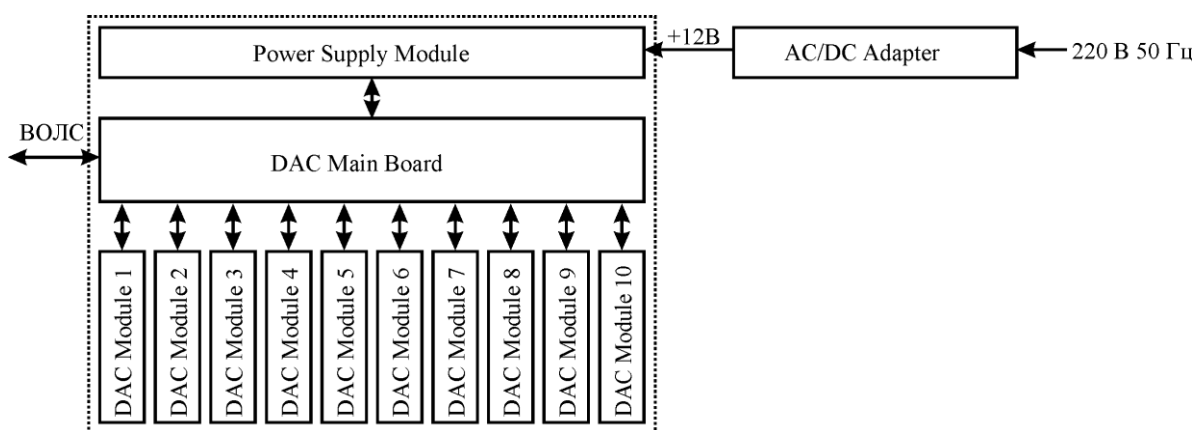


Рис.2. Структурная схема основного блока ЦАП

Основная плата ЦАП (DAC Main Board) осуществляет коммуникационные функции с платой расширения PCI-E и соответствующее управление непосредственно модулями ЦАП (DAC Module). На рис.2 показано 10 каналов. Вторичное питание основной платы формируется модулем Power Supply Module. Первичное питание +12 В формируется стандартным сетевым адаптером (AC/DC Adapter). Основная плата, модули ЦАП и модуль вторичного питания располагаются внутри единого корпуса. Между собой эти устройства разделены металлическими экранами для увеличения помехозащищенности модулей ЦАП.

Упрощенная структура основной платы ЦАП представлена на рис.3.

В состав платы входят следующие основные блоки:

- микросхема FPGA, выполняющая основные задачи по приему данных от оптоволоконного приемопередатчика SFP, декодирование принятых данных и управление модулями ЦАП;
- загрузочная память FLASH для FPGA;
- микроконтроллер MCU, выполняющий контроль напряжений питания схемы, контроль и управление загрузкой FPGA, управление схемой калибровки на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- порты RS-232 и USB для облегчения отладки;
- разъемы DAC Connectors, используемые для подключения модулей ЦАП.

Формирование начальных питаний осуществляется платой вторичного источника питания (Power Supply Module на рис. 2) и встроенными линейными стабилизаторами самой основной платы (на рис. 3 эти компоненты объединены под названием Power Supply Module).

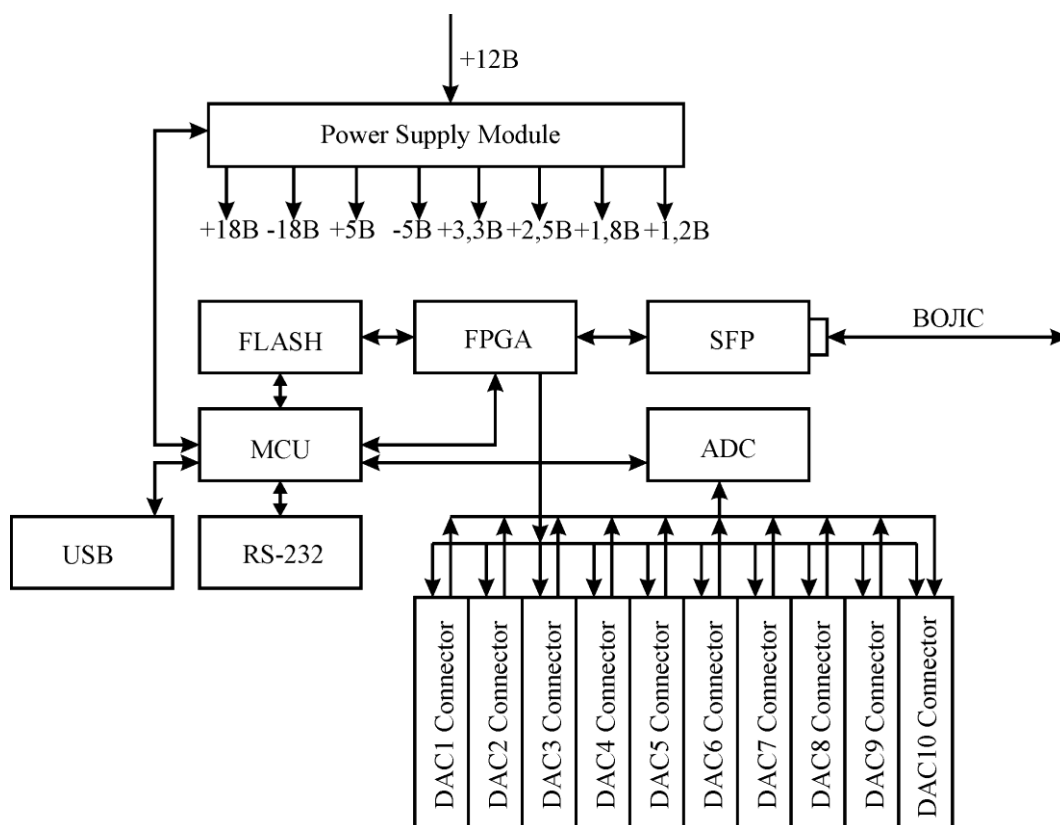


Рис.3. Структурная схема основной платы ЦАП

Так же как и в карте расширения, в качестве FPGA используется микросхема XC6SLX45T компании Xilinx, имеющая встроенный последовательный трансивер.

Для обеспечения возможности калибровки нулевого значения напряжения на выходах модулей ЦАП на основной плате предусмотрен биполярный АЦП (ADC) с разрядностью 20 бит.

Структура одного модуля ЦАП в упрощенном виде представлена на рис. 4.

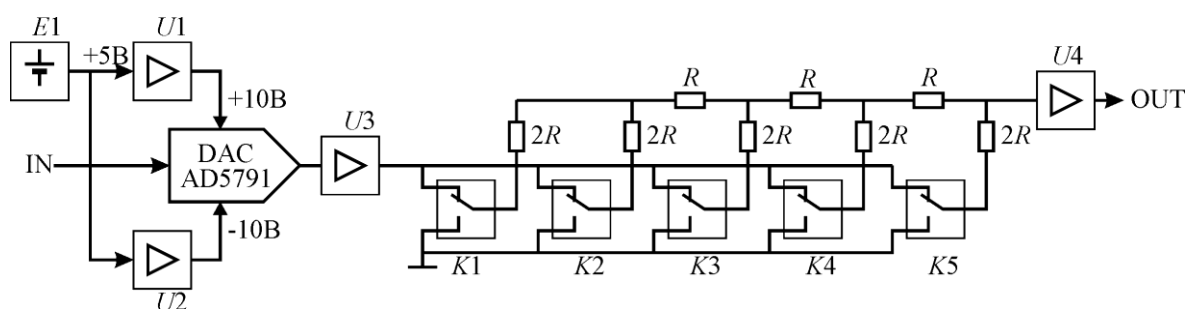


Рис.4. Структурная схема модуля ЦАП

Сигналы цифрового управления от входа IN поступают на соответствующие входные линии микросхемы ЦАП (DAC) AD5791 [6]. Микросхема выполняет 20-битное преобразование в диапазоне  $\pm 10$  В. Опорное напряжение +5 В формируется источником E1. Далее это напряжение преобразуется в опорное напряжение +10 В усилителем U1 и в напряжение -10 В усилителем U2. Выходное напряжение DAC через буферный повторитель U3 поступает на схему аттенюатора, выполненного на основе резистивной матрицы R-2R и ключей K1-K5. Аттенюатор позволяет получить 17 градаций коэффи-

циентов усиления выходного напряжения: 0, 1/16, 2/16, 3/16, ..., 15/16 и 1. Таким образом, суммарная разрядность преобразования модуля ЦАП составляет 24 бита.

Результаты измерения характеристик выходных сигналов представлены в таблице.

#### Характеристики выходных сигналов

Параметр	Обозначение параметра	Значение
Суммарная разрядность преобразования модуля ЦАП	$N_{DAC}$	24 бита
Диапазон выходных напряжений	$U_{out}$	$\pm 10$ В
Напряжение смещения нуля без калибровки, типовое значение при 25°C	$U_{err\_typ}$	0,82 мВ
Напряжение смещения нуля без калибровки, максимальное значение при 25°C	$U_{err\_max}$	1,2 мВ
Напряжение смещения нуля после калибровки, максимальное значение при 25°C	$U_{err\_cl}$	19 мкВ
Ошибка полной шкалы	$\delta_{fs}$	0,0275 %
Погрешность аттенюатора	$\delta_{att}$	0,09 %
Интегральная нелинейность ЦАП (при фиксированном коэффициенте ослабления аттенюатора)	INE	0,0001 %
Дифференциальная нелинейность ЦАП (при фиксированном коэффициенте ослабления аттенюатора)	DNE	0,0001 %
Время установки ЦАП при фиксированном коэффициенте ослабления аттенюатора (10-вольтовый шаг с точностью установки 0,02%)	$t_{DAC}$	1 мкс
Максимальная постоянная времени установки аттенюатора	$\tau_{att}$	0,3 мкс
Максимальное время установки аттенюатора при фиксированном напряжении на выходе ЦАП для достижения точности установки 3,5 % 0,1 % 0,02 %	$t_{att}(3,5\%)$ $t_{att}(0,1\%)$ $t_{att}(0,02\%)$	1 мкс 2,1 мкс 2,6 мкс
Нагрузочная способность выхода модуля ЦАП	$I_{out}$	$\pm 35$ мА
Выходное сопротивление модуля ЦАП	$r_{out}$	10 Ом
Спектральная плотность напряжения шума на выходе модуля ЦАП	$e_{out}$	16 нВ / $\sqrt{\text{Гц}}$

**Заключение.** Рассмотренный 12-канальный 24-битный генератор аналоговых сигналов доведен до уровня опытных образцов, успешно прошедших лабораторно-стендовые испытания. Разработано тестовое и рабочее программное обеспечение.

#### Литература

1. Соловьев А.Н., Алексеев В.Е., Саблин А.В. Построение навигационной инерциальной системы на основе распределенного множества полупроводниковых акселерометров // Изв. вузов. Электроника. – 2012. – № 4 (96). – С. 73–79.
2. Крыликов Н.О., Плавич М.Л. Разработка многоканального высокочастотного программно-перестраиваемого генератора псевдослучайной последовательности // Изв. вузов. Электроника. – 2012. – № 3 (95). – С. 83, 84.
3. Xilinx, Inc. Spartan-6 Family Overview, DS160 (v1.5) // Advance Product Specification. – 2010. – Aug. 2.

4. Xilinx, Inc., Spartan-6 FPGA GTP Transceivers, UG386 (v2.2) // Advance Product Specification. – 2010. – Apr. 30.
5. Finisar Corporation, 2.125 Gb/s RoHS Compliant Short-Wavelength SFP Transceiver FTLF8519P3ByL // Rev. B.4. – 2011. – Jan. 19.
6. Analog Devices, 1 ppm 20-Bit,  $\pm 1$  LSB INL, Voltage Output DAC AD5791. – Data Sheet, 2010–2011.

Статья поступила  
11 июня 2014 г.

**Крыликов Николай Олегович** – доктор технических наук, начальник сектора НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ. *Область научных интересов:* вычислительные системы специального назначения, информационно-управляющие системы и комплексы транспортных объектов, приборная база для геофизических исследований. **E-mail: krylikov-no@rambler.ru**

**Плавич Максим Леонидович** – инженер-электроник НИИ вычислительных средств и систем управления МИЭТ. *Область научных интересов:* цифровая и аналоговая схемотехника, микроконтроллерные встраиваемые системы управления.

### **Информация для читателей журнала «Известия высших учебных заведений. Электроника»**

С тематическими указателями статей за 1996 - 2014 гг., аннотациями и содержанием последних номеров на русском и английском языках можно ознакомиться на нашем сайте:

**<http://www.miet.ru>**