

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.10>

УДК: 621.396

РЕАЛИЗАЦИЯ БЛОКА ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОРЕНЦА НА ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМАХ

П.С. Остапенков, Е.Д. Соловьев, Д.С. Селин, Е.А. Казаков

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Статья поступила в редакцию 30 августа 2022 г.

Аннотация. В статье описывается реализация блока формирования прямохаотических сигналов на основе динамической системы Лоренца на основе программируемых логических интегральных схем. Блок предназначен для формирования широкополосных хаотических сигналов в системах реального времени. Расчет нелинейной динамической системы Лоренца осуществляется в форматах с плавающей точкой и с фиксированной точкой половинной точности. В качестве основной задачи реализации является оптимизации алгоритма с минимальным использованием блоков цифровой обработки сигналов кристалла программируемой логической интегральной схемы. Проводится сравнительный анализ реализации блока формирования по требуемым ресурсам в форматах с плавающей точкой и с фиксированной точкой половинной точности.

Ключевые слова: хаотические сигналы, динамические системы, формат с плавающей точкой, программируемые логические интегральные схемы, цифровая обработка сигналов, широкополосные сигналы.

Автор для переписки: Соловьев Евгений Дмитриевич, diviniy@yandex.ru

Введение

Широкополосные сигналы в настоящее время находят применение в различных системах: системах связи, передачи информации, локации и многих других. К достоинствам широкополосных систем можно отнести эффективное использование полосы спектра сигналов, высокую скрытность передачи, высокую помехозащищенность и пр. [1,2]. В качестве одного из видов сигналов в широкополосных системах могут использоваться хаотические сигналы [3].

Формирование хаотических сигналов возможно в аналоговой, и цифровой формах. Подходы к использованию хаотических сигналов в системах связи могут существенно отличаться, при этом на практике широко используются как прямохаотические сигналы, так и сигналы с хаотической несущей или сигналы с хаотической модуляцией [2-4].

В статье рассматривается способ формирования прямохаотических сигналов в цифровой форме на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) компании Xilinx для реализации в системах реального времени; в качестве примера расчета нелинейной динамической системы, выбрана динамическая система Лоренца.

Отличительной особенностью динамических систем является высокая чувствительность к начальным условиям и формату представления фиксированных коэффициентов и переменных. Выбор формата представления чисел с фиксированной или плавающей точкой и разрядности существенно сказываются на точности расчета нелинейной системы дифференциальных уравнений. В связи с перечисленным выше, для реализации расчета динамической системы и формирования хаотических сигналов на её основе, выдвигаются требования к точности представления результата, скорости расчета системы и формирования хаотических сигналов. На основе этих требований определяется наиболее подходящий инструмент для реализации проекта.

Использование программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) для формирования широкополосных хаотических сигналов на основе динамических систем позволяет получить высокую скорость формирования

сигнала, с требуемой для практических применений точностью и реализовывать генераторы прямохаотических сигналов для систем «реального времени».

В основе архитектуры современных кристаллов ПЛИС Xilinx лежат конфигурируемые логические блоки, содержащие таблицы спецификации для реализации логических функций, блоки цифровой обработки сигналов DSP48E1, элементы памяти и пр. [5]. При реализации алгоритмов работы системы стараются оптимальным образом использовать все ресурсы ПЛИС, при этом одну и ту же функцию можно реализовывать, как на конфигурируемых логических блоках, так и на блоках цифровой обработки сигналов, но последних в кристаллах ПЛИС на порядок меньше. Одной из задач является оптимизация алгоритма, представленного в статье, для минимизации использования блоков DSP48E1 при заданной точности представления результата.

Для формирования хаотических сигналов на основе нелинейной динамической системы Лоренца, при расчете системы применяется формат представления чисел FP23 с плавающей точкой, оптимизированный под внутренние блоки DSP48E1 ПЛИС (xc7z020clg400-1) компании Xilinx. Проектирование осуществляется в САПР Vivado компании Xilinx.

1. Цели

Для расчета системы Лоренца и построения аттрактора осуществляются рекуррентные, последовательные вычисления параметров нелинейной динамической системы. Динамические системы очень чувствительны к начальным условиям, на результат формирования прямохаотических сигналов будет оказывать существенное влияние выбор формата представления и разрядности коэффициентов данных и переменных. Для реализации расчета динамической системы и формирования прямохаотических сигналов с приемлемой для практического применения точностью, приходится использовать достаточно высокую разрядность для представления чисел (32 и более разрядов при представлении чисел в формате с фиксированной точкой). При меньшем количестве разрядов, например, при использовании 16-разрядной

сетки, погрешность представления чисел и систематическая ошибка метода расчета системы сильно влияют на окончательный результат и часто являются неприемлемыми для практического применения. Одним из вариантов решения этой проблемы является повышение разрядности представления чисел в системах с фиксированной точкой, или использование форматов представления чисел с плавающей точкой.

Для реализации системы с учетом высокой разрядности (32 и более разрядов) на ПЛИС требуются значительные ресурсы. Арифметические и логические операции в ПЛИС часто реализуются с применением специализированных блоков цифровой обработки сигналов DSP48E1, количество которых в ПЛИС ограничено и существенно меньше стандартных конфигурируемых логических блоков (CLB), на базе которых также могут быть реализованы логические функции [4,5]. Следует учитывать и особенности аппаратной реализации блоков DSP48E1, разрядность которых позволяет проводить операцию перемножения двух 18-разрядных операндов с фиксированной точкой, поступающих на вход (за 1 такт), а в случае использования чисел большей разрядности, например, для выполнения операции умножения, приходится задействовать уже не один, а несколько блоков DSP48E1.

Использование 18-разрядного формата с фиксированной точкой для представления чисел приводит к значительной погрешности при расчете системы. Для обеспечения требуемой на практике точности расчета динамической системы и минимизации количества задействованных блоков цифровой обработки сигналов (ЦОС) DSP48E1 предлагается использовать формат представления чисел с плавающей точкой FP23. Рассмотрим формат FP23 более подробно.

2. Представление чисел в формате FP23

FP23 – это особый формат представления чисел с плавающей точкой. Использование этого формата наиболее удобно при реализации устройства на современных кристаллах ПЛИС, поскольку этот формат ориентирован на разрядность операторов модулей цифровой обработки сигналов DSP48E1 ПЛИС “Xilinx” [5,6].

Длина слова в формате FP23 составляет 23 бита. Следующая формула в упрощенном виде отражает представление числа «А» в формате FP23:

$$A = (-1)^{\text{sign}(A)} \cdot 2^{\text{exp}(A-32)} \cdot M(A), \quad (1)$$

где $\text{sign}(A)$ – знак числа, $\text{exp}(A - 32)$ – экспонента (порядка числа), $M(A)$ – мантисса числа.

Мантисса – это 17-битное положительное число, которое всегда отображается в нормализованном виде (самый старший бит мантиссы всегда равен «1»). Экспонента или порядок основания системы счисления в формате FP23 – это 6-битное положительное число. Под знак числа выделяется один бит, нулевое значение бита соответствует положительным числам, а «1» определяет отрицательные числа. Таким образом, число в формате FP23 описывается тремя битовыми полями, как показано на рис. 1.

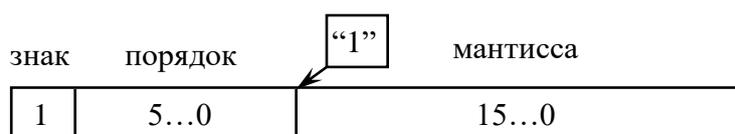


Рис. 1. Разрядная сетка для формата FP23

В таблице 1 представлена структура слова в формате FP23.

Табл. 1. Структура слова в формате FP23

Название	Обозначение	Диапазон значений	Длина (бит)	Положение бита в слове
знак мантиссы	sign	0-1	1	22
экспонента	exp	0-63	6	21...16
мантисса	M	0-131071	16	15...0

3. Погрешности представления чисел в форматах с фиксированной точкой

Для систем, использующих числа с фиксированной точкой абсолютная погрешность постоянна и равна половине младшего разряда [7]. Относительная погрешность для систем с фиксированной точкой, зависит от величины числа и колеблется в пределах от ε_{\min} для больших чисел, до ε_{\max} для малых чисел, как показано в (2), (3):

$$\varepsilon_{\min} = \left| \frac{\Delta}{A_{\max}} \right| = \frac{2^{-(n+1)}}{1-2^{-n}} \approx 2^{-(n+1)}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{\max} = \left| \frac{\Delta}{A_{\min}} \right| = \frac{2^{-(n+1)}}{2^{-n}} \approx 2^{-1}, \quad (3)$$

где n – количество разрядов числа, представленного с фиксированной точкой, A_{\max} – максимальное значение числа, A_{\min} – минимальное значение числа.

В табл. 2 показаны абсолютные и относительные погрешности для разных форматов с фиксированной точкой.

В формате `fixdt(1,64,32)` 32 бита составляют дробную часть, в форматах `fixdt(1,32,16)` и `fixdt(1,16,8)` дробные части равны 16-ти и 8-ми битам соответственно.

Табл. 2. Абсолютные и относительные погрешности для разных форматов с фиксированной точкой

Формат числа	Абсолютная погрешность	Минимальная относительная погрешность	Максимальная относительная погрешность
<code>fixdt(1,64,32)</code>	$1,164 \cdot 10^{-10}$	$1,164 \cdot 10^{-10}$	0,5
<code>fixdt(1,32,16)</code>	$7,629 \cdot 10^{-6}$	$7,629 \cdot 10^{-6}$	0,5
<code>fixdt(1,16,8)</code>	$1,953 \cdot 10^{-3}$	$1,953 \cdot 10^{-3}$	0,5

4. Погрешности представления чисел в форматах с плавающей точкой

Абсолютная погрешность представления чисел с плавающей точкой определяется по формуле (4) [7,8]:

$$\Delta = \Delta a \cdot 2^m, \quad (4)$$

где Δa – погрешность представления мантиссы (определяется аналогично абсолютной погрешности представления чисел в машинах с фиксированной запятой), m – порядок числа.

Порядок числа изменяется в следующих пределах:

$$-(2^k - 1) \leq m \leq +(2^k - 1), \quad (5)$$

где k – количество разрядов, которые отводятся под порядок числа.

Абсолютная погрешность представления чисел для чисел с плавающей точкой находится в пределах [7]:

$$\Delta_{\min} = 2^{-(n+1)} \cdot 2^{-(2^k - 1)} = 2^{-(n+2^k)}, \quad (6)$$

$$\Delta_{\max} = 2^{-(n+1)} \cdot 2^{(2^k - 1)} = 2^{(2^k - n - 2)}. \quad (7)$$

Для формата FP23 $n = 17$, $k = 6$.

Для систем, использующих формат представления с плавающей точкой, абсолютная погрешность представления чисел зависит не только от разрядности мантиссы, но в первую очередь от порядка числа. Минимальная погрешность достигается при наибольшем отрицательном порядке числа, максимальная – при наибольшем положительном порядке.

Относительная погрешность отображения чисел с плавающей точкой во всем диапазоне представления практически постоянна, и измеряется по общему правилу [7]. Относительная погрешность представления для чисел с нормализованной мантиссой зависит от разрядности мантиссы. В табл.3 показаны абсолютные и относительные погрешности для формата FP23.

Табл. 3. Относительные погрешности формата FP23

Формат числа	Минимальная абсолютная погрешность	Максимальная абсолютная погрешность	Минимальная относительная погрешность	Максимальная относительная погрешность
FP23	$3,553 \cdot 10^{-15}$	$1,638 \cdot 10^4$	$7,629 \cdot 10^{-6}$	$1,526 \cdot 10^{-5}$

При сравнении полученных результатов, представленных в табл.2,3 видно, что по минимальной относительной погрешности представление чисел в формате FP23 близко к формату нормальной точности с фиксированной точкой со знаком и 16 разрядной дробной частью $\text{fixdt}(1,32,16)$.

5. Моделирование динамической системы Лоренца

Система Лоренца определяется тремя обыкновенными дифференциальными уравнениями [4,6]:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x), \\ \dot{y} = x(r - z) - y, \\ \dot{z} = xy - bz \end{cases} \quad (8)$$

где x, y, z – координаты от времени, определяющие текущее состояние системы; σ, r, b – константы.

Для расчета модели динамической системы используем дискретизацию по времени, типовые параметры констант $\sigma = 10, r = 28, b = 8/3$, и следующие начальные условия:

$$x(0) = 1, y(0) = 0, z(0) = 0.$$

Для моделирования будем использовать логические блоки, осуществляющие операции над числами в формате FP23: интегратор, сумматор (вычитатель), умножитель, блок задержки, блоки перевода из чисел из формата с плавающей точкой в фиксированную ($\text{float to fix point}$).

Структурная схема реализации на ПЛИС нелинейной динамической системы Лоренца представлена на рис. 2. На схеме $K_{масшт} = 0,001$ – масштабный коэффициент, обеспечивает работу системы в заданном диапазоне

значений. Масштабные коэффициенты $K_{ЦАП1}$ и $K_{ЦАП2}$ обеспечивают подстройку диапазона выходных значений данных для корректной передачи на ЦАП.

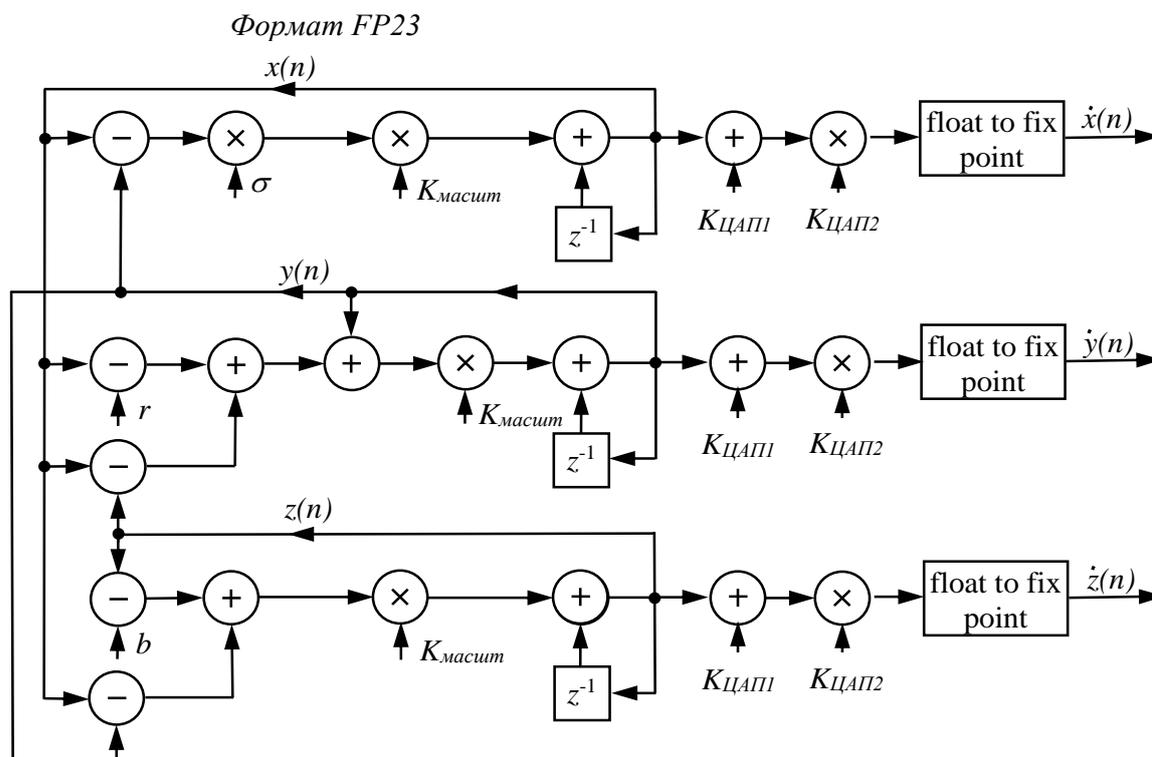


Рис. 2. Структурная схема реализации генератора прямохаотических сигналов на основе динамической системы Лоренца в формате с плавающей точкой FP23

Минимальная задержка выдачи данных на выходе системы составляет 75 тактов, относительно частоты тактирования $f_{такт} = 250,00$ МГц. Наиболее инерционным блоком является интегратор, который в течение 75 тактов осуществляет накопление отсчетов сигнала для корректного выполнения операции сложения с задержанным отсчетом с предыдущего такта. Таким образом, частота дискретизации формируемых прямохаотических сигналов по координатам $x(t')$, $y(t')$, $z(t')$ составляет $f_{\delta} = 3,32$ МГц.

В качестве управляющих сигналов для синхронизации работы всех блоков в проекте используются тактовый сигнал, сигнал сброса, сигнал разрешения выдачи выходных данных (для более наглядного представления структурной схемы эти сигналы на схеме не показаны).

Функциональное моделирование работы системы осуществлялось в САПР «Vivado». Данные, полученные при функциональном моделировании в САПР

«Vivado», сохранялись в файлы, построение графиков осуществлялось в САПР «MATLAB». На рис. 3. представлены результаты моделирования, полученные при расчете динамической системы Лоренца по координатам $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$.

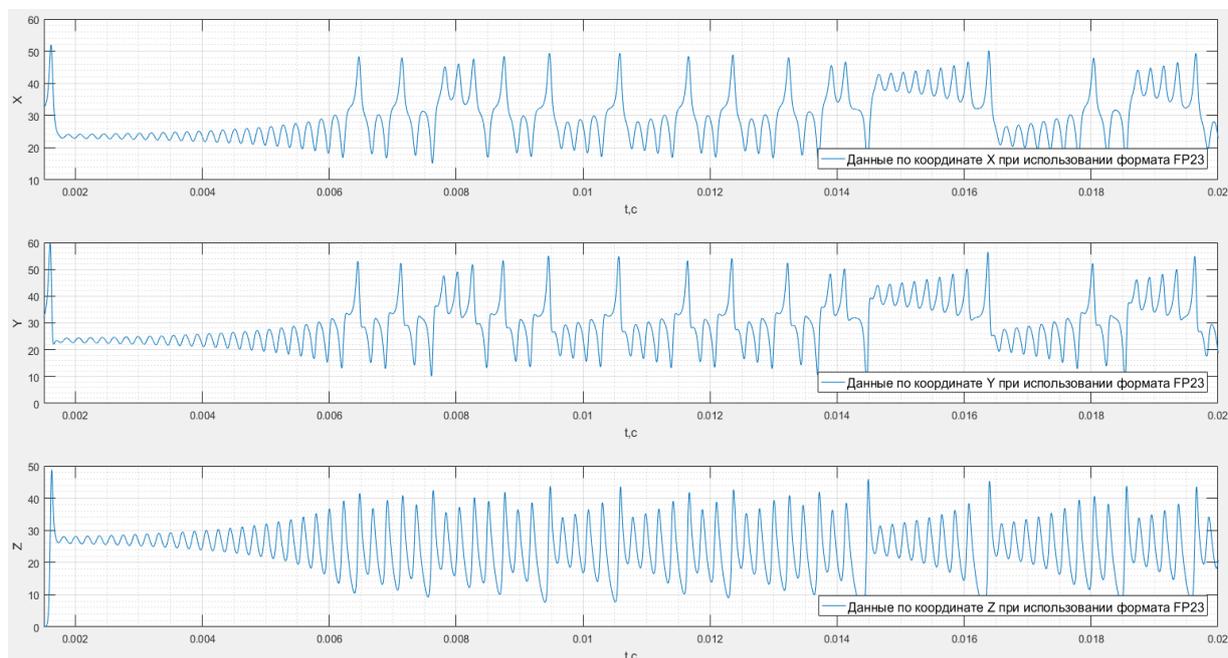


Рис. 3. Результаты моделирования динамической системы Лоренца по координатам X, Y, Z

Более быстрым по времени этапом разработки системы может служить использование пакета «Simulink» в составе САПР «MATLAB», который позволяет сформировать проект прикладной программы для ПЛИС на языке VHDL. Ограничением применения пакета «Simulink» для форматирования кода на VHDL для проекта на ПЛИС является представление данных в формате с фиксированной точкой, что в ряде случаев ограничивает применимость реализации таких систем.

Проверка моделей прикладных программ для ПЛИС осуществлялась на отладочных модулях Z-Turn Board компании MYIR Tech Ltd. с кристаллами ПЛИС Xilinx 7 серии (xc7z020clg400-1) с применением САПР «Vivado».

Результаты сравнения моделей прикладных программ для ПЛИС по требуемым ресурсам, для моделей в формате с плавающей точкой FP23, и с фиксированной точкой в формате fixdt(1,32,16), полученной с использованием пакета «Simulink» представлены в таблице 4 (для формата fixdt (1,32,16) –

предполагается использование 32 разрядного слова с фиксированной точкой, со знаком и дробной частью равной 16 разрядам).

Табл. 4. Количество задействованных блоков кристалла xc7z020clg400-1 для моделей в форматах FP23 и fixdt(1,32,16)

Логический блок	Доступно (100 %)	Формат FP23		Формат fixdt(1,32,16)	
		использовано	В процентах	использовано	В процентах
Таблицы спецификации (LUT)	53200	6186	35,15%	5205	29,57%
Распределенная память (LUTRAM)	17400	3783	63,05%	3588	59,80%
Триггеры (FlipFlops)	106400	3673	10,43%	671	1,91%
Блоки ЦОС (DSP48E1)	220	9	11,25%	16	20,00%
Блоки ввода/вывода (IO)	125	9	9,00%	9	9,00%

6. Экспериментальные результаты

Для проведения эксперимента использовались персональный компьютер, отладочный модуль Z-Turn Board компании MYIR Tech Ltd., отладочная плата для ЦАП AD5686R компании Analog Device, осциллограф Agilent Technologies MSO-X 3054A.

ЦАП AD5686R является 4-канальным с последовательной загрузкой. Расчет системы Лоренца осуществлялся на ПЛИС и далее данные, соответствующие координатам системы $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ передавались на ЦАП. В результате на выходах ЦАП были получены реализации хаотических сигналов по координатам системы Лоренца $x(t')$, $y(t')$, $z(t')$, которые наблюдались на осциллографе. Полученные осциллограммы представлены на рис. 4.

Максимальная частота дискретизации сигналов на выходе ЦАП AD5686, определялась выбором режима работы ЦАП, и составила $f_{д_ЦАП} = 916$ кГц, что меньше максимально возможной частоты формирования сигналов модели на выходах ПЛИС. Количество отсчетов, которое выводилось для формирования импульсов сигналов с хаотическим заполнением, было равно $N = 1024$, и соответствовало длительности реализации сигналов 1,0662 мс. Полученные на ПЛИС реализации расчета в формате с плавающей точкой FP23 соответствуют системе Лоренца. Проведенное сравнение с результатами, полученными в процессе моделирования в САПР «MATLAB» и в пакете «Simulink» показывают, что параметры выбора формата представления чисел при расчете динамических систем (представление чисел с двойной точностью – в САПР «MATLAB», с фиксированной точкой – в пакете «Simulink» `fixdt(1,32,16)`) будут оказывать существенное влияние на результаты. За счет высокой чувствительности динамических систем к точности представления чисел, результаты моделирования при разной точности представления, начинают быстро “расходиться”.

На рис. 5 представлены осциллограммы начального участка системы Лоренца для координаты $y(t')$, для формата представления числа с плавающей точкой FP23 (рис. 5а) и формата фиксированной точкой `fixdt(1,32,16)` (рис. 5б).

На представленных на рис. 5. осциллограммах масштаб развертки по оси времени в формате с плавающей точкой (рис. 5а) составляет 5 мс, с фиксированной точкой `fixdt(1,32,16)` (рис. 5б) – 20 мс, масштаб развертки по амплитуде в обоих случаях составляет 50 мВ к клетке.

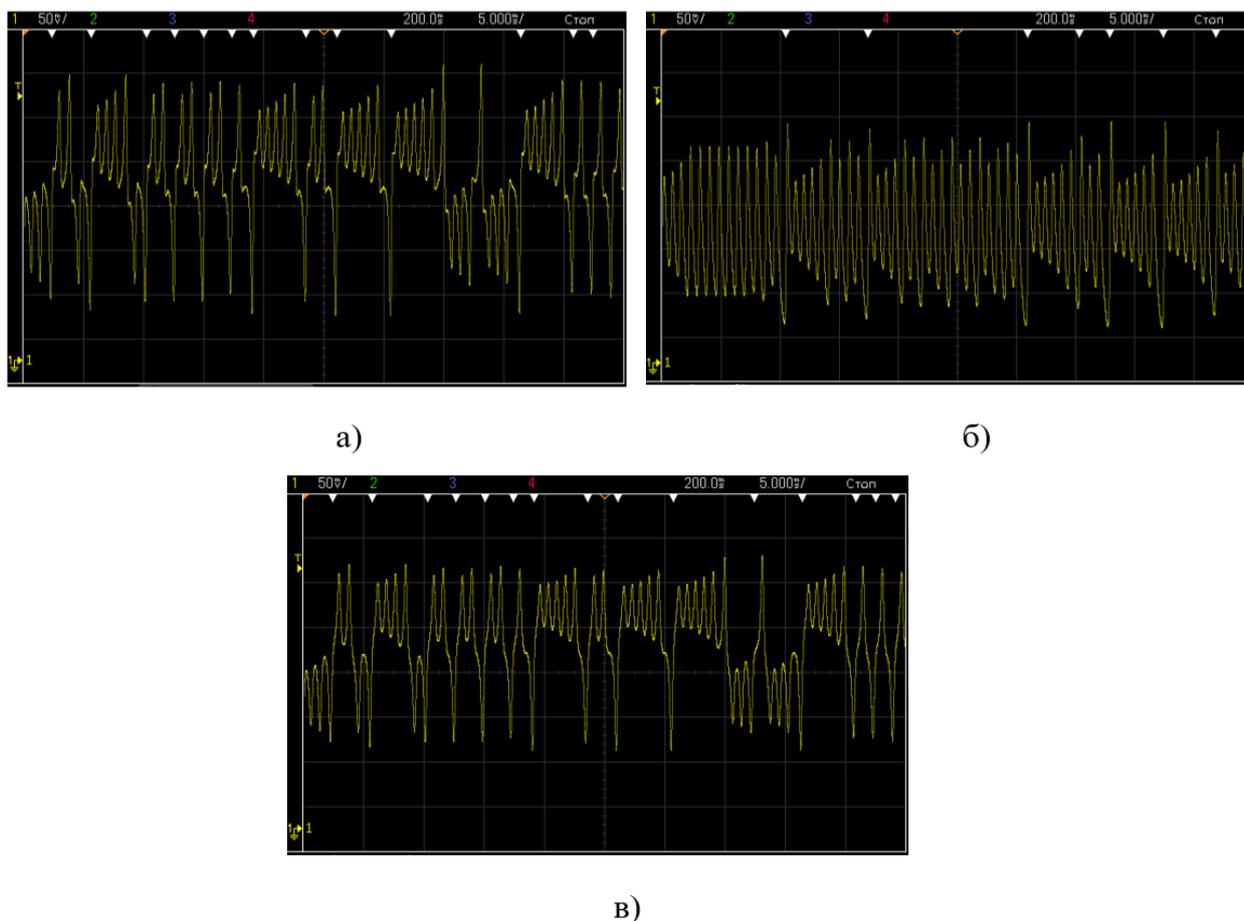
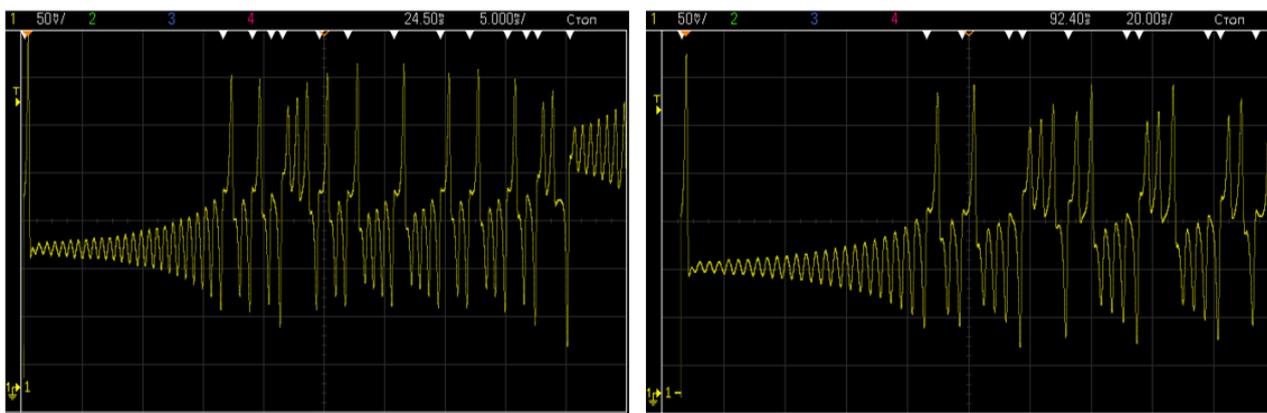


Рис. 4. Реализация хаотических сигналов системы Лоренца: а) по координате $x(t')$, б) по координате $y(t')$, в) по координате $z(t')$
 [на осциллограммах масштаб значений по оси амплитуды 50 мВ в клетке, масштаб по оси времени – 5 мс в клетке]

На представленных на рис. 5. осциллограммах масштаб развертки по оси времени в формате с плавающей точкой (рис. 5а) составляет 5 мс, с фиксированной точкой `fixdt(1,32,16)` (рис. 5б) – 20 мс, масштаб развертки по амплитуде в обоих случаях составляет 50 мВ к клетке.



а)

б)

Рис. 5. Результаты реализации динамической системы Лоренца по координате $y(t')$: а) формат с плавающей точкой FP23, б) формат с фиксированной точкой fixdt(1,32,16)

При реализации расчета систем существенное значение оказывает погрешность представление результата и накапливающаяся систематическая ошибка методов расчета, связанная с особенностями реализации. В зависимости от практических применений и требуемой точности представления результатов расчетов при формировании хаотических сигналов и расчете динамических систем, следует учитывать как выбор формата представления чисел, так и разрядность представления чисел.

Одной из основных характеристик динамической системы является фазовый аттрактор. На рис. 6 показаны эпюры осциллограмм фазового аттрактора системы Лоренца в дискретных отсчетах на плоскостях XY, XZ, полученные на осциллографе.

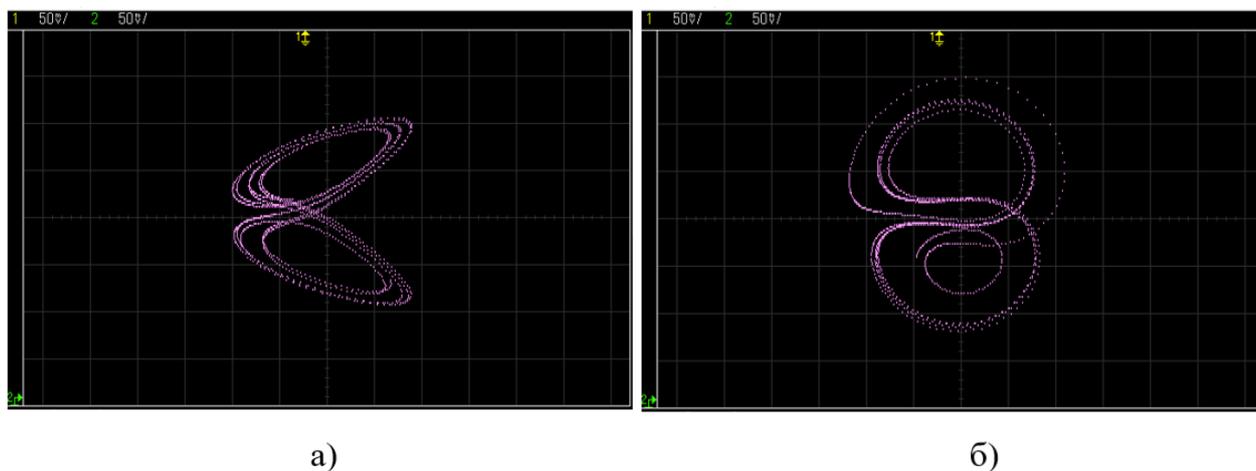


Рис. 6. Результаты построения фазового аттрактора динамической системы Лоренца при использовании формата FP23:

а) на плоскости XZ,

б) на плоскости XY

(развертка по осям X и Y по амплитуде составляет 50 мВ в клетке)

Отображение аттрактора проводилось в дискретных отсчетах при работе осциллографа в режиме «высокое разрешение». При работе в этом режиме усредняются дополнительные выборки и уменьшается случайный шум.

Заключение

При реализации расчета динамических систем для формирования хаотических сигналов следует руководствоваться требуемой для практических применений скоростью формирования хаотических сигналов, допусками к точности отображения результата. Исходя из перечисленных требований, подбирается инструмент для возможной реализации расчета динамической системы. Одним из возможных способов расчета динамических систем для формирования хаотических сигналов в «реальном времени» является применение ПЛИС. При формировании моделей для прикладной программы для ПЛИС можно использовать несколько подходов и разных САПР.

Сравнение полученных моделей показывает, что реализация генератора с помощью пакета «Simulink» позволяет сформировать и функционально проверить модель с фиксированной точкой достаточно «легко», и сравнительно

«быстро», относительно формирования модели непосредственно на языке VHDL в САПР «Vivado».

В тоже время, использование пакета «Simulink» накладывает ряд существенных ограничений при формировании кода на VHDL для прикладных программ для ПЛИС:

1) присутствуют ограничения на объем и сложность модели для конвертации, т.е. при формировании и расчете сложных моделей, например, динамических систем высокой разрядности (выше третьей) возникают ошибки при операциях конвертации таких моделей в код VHDL;

2) перевод моделей из пакета «Simulink» в код, описания прикладной программы для ПЛИС, может осуществляться напрямую только в формате с фиксированной точкой (в пакете отсутствует поддержка форматов с плавающей точкой для перевода в код на язык VHDL);

3) модели динамических систем очень чувствительны к погрешностям представления констант и переменных, используемых в расчете, что требует использования высокой разрядности при использовании форматов с фиксированной точкой или перехода к форматам с плавающей точкой.

4) при использовании моделей в пакете «Simulink» возникают сложности при оптимизации кода при работе с кристаллами ПЛИС на практике.

Вместе с тем, при формировании динамических систем на базе логических блоков, описанных на языке VHDL, эти недостатки отсутствуют, но для формирования и функциональной проверки аналогичной модели требуется существенно больше временных и трудовых затрат.

Рассмотрим результаты моделирования системы Лоренца. При проектировании динамической системы опорная тактовая частота работы ПЛИС составляла 250 МГц.

Для реализации на ПЛИС была сформирована модель устройства с фиксированной точкой в формате fixdt(1,32,16) с использованием пакета «Simulink», позволяющая получить требуемую в задании точность. При построении модели с фиксированной точкой fixdt(1,32,16) было использовано 16

блоков цифровой обработки DSP48E1, 8793 ячеек таблиц спецификации LUT. Максимальная частота передачи дискретных отсчетов получаемых реализаций хаотических сигналов на выходах ПЛИС составила 10,00 МГц.

При использовании формата FP23 удалось получить точность вычисления, сопоставимую с форматом с фиксированной точкой с разрядностью 32 бита `fixdt(1,32,16)`, при этом было использовано 9 блоков цифровой обработки DSP48E1 и 9 969 ячеек LUT. Максимальная частота передачи дискретных отсчетов на выходе ПЛИС составила 3,33 МГц.

При реализации динамической системы Лоренца с использованием формата с плавающей точкой FP23 задействовано приблизительно на 44% меньше блоков цифровой обработки сигналов DSP48E1, но увеличивается на 13 % количество используемых ячеек таблиц спецификации LUT по сравнению с реализацией с фиксированной точкой `fixdt(1,32,16)` (см. в табл. 4). Поскольку ресурсов кристаллов ПЛИС по распределенной логике и памяти (LUT, LUTRAM), доступных к использованию, гораздо больше, нежели количества блоков DSP48E1, при реализации сложных моделей по расчету систем на основе дифференциальных уравнений, включая динамические системы, использование формата с плавающей точкой FP23 будет оправдано, несмотря на более высокую сложность реализации.

При выборе формата представления чисел для реализации динамических систем на ПЛИС следует учитывать требуемые частоты формирования выходных хаотических сигналов и доступные ресурсы ПЛИС. Очевидно, что использование форматов с плавающей точкой при расчетах требует больших временных затрат при прочих равных условиях.

При использовании формата с плавающей точкой FP23 появляется возможность проектирования динамических систем более высокой размерности, по сравнению с возможностями, представленными с использованием пакета "Simulink"; более экономично используются ресурсы кристалла ПЛИС по блокам цифровой обработки DSP48E1. Дополнительным достоинством использования ПЛИС является возможность распараллеливания вычислений

при реализации алгоритма расчета системы. Распараллеливание операций при реализации динамических систем более высоких размерностей позволяет осуществлять вычисления и выдачу отсчетов выходных данных с сопоставимыми задержками, как и описанной в статье системе Лоренца.

Предложенные в статье подходы показывают возможность аппаратного формирования хаотических сигналов на ПЛИС в формате с плавающей точкой FP23 для систем «реального времени», где требуются сравнительно невысокие скорости формирования (обработки) сигналов, например, для гидроакустических локационных систем или систем подводной связи. Генераторы хаотических сигналов на основе динамической системы Лоренца на базе ПЛИС могут быть использованы в цифровых системах кодирования, обработки и передачи информации и в других системах, в которых требуется формировать хаотические последовательности на частотах до нескольких МГц в «реальном времени».

Литература

1. Кислов В.Я., Колесов В.В., Беляев Р.В. Применение хаотических сигналов в информационных технологиях. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2009. Т.1. №.1-2. С.23-32.
2. Гуляев Ю.В., Беляев Р.В., и др. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи обработки, хранения и защиты информации. *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2018. Т.10. №2. С.279-312.
3. Залогин Н.Н., Кислов В.В. *Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах*. Москва, Радиотехника. 2006. 208 с.

4. Лемешко Н., Горелкин М., Струнин П. Исследование аттрактора Лоренца для формирования псевдослучайных битовых последовательностей и экспериментальное исследование его свойств. *Компоненты и технологии*. 2022. №2. С.95-107.
5. Капитанов А.А., Остапенков П.С. Реализация высокоскоростного блока быстрого преобразования Фурье на программируемых логических интегральных схемах. *Вестник Московского энергетического института*. 2015. №2. С.92-97.
6. Капитанов А.А., Остапенков П.С. Особенности формирования хаотических широкополосных сигналов на базе программируемых логических интегральных схем. *Вопросы науки*. 2015. Т.4. С.13-17.
7. Форсайт Д., Малькольм М., Моулер К. *Машинные методы математических вычислений*. Москва, Мир. 1980.
8. Захаров М.Г., Исполлов Ю.Г., Полянский В.А., Скубов Д.Ю., Смольников Б.А., Суханов А.А., Ходжаев К.Ш. *Моделирование и оптимизация динамических систем: учебное пособие*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. университета. 2010. 204 с.

Для цитирования:

Остапенков П.С., Соловьев Е.Д., Селин Д.С., Казаков Е.А. Реализация блока формирования сигналов на основе динамической системы Лоренца на программируемых логических интегральных схемах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.10>