

Р.Р. Раупов, В.В. Афанасьев

(г. Казань, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЯЕМОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ MULTI-SCROLL ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО СХЕМЕ JERK

MODELLING OF SIGNAL GENERATORS BASED ON A CONTROLLED NONLINEAR MULTI-SCROLL DYNAMIC SYSTEM ON THE JERK CIRCUIT

Проведено моделирование и исследование генератора псевдослучайных сигналов на основе multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk для дальнейшего применения в прямохаотических системах цифровой передачи информации. Выработаны инженерные рекомендации по выбору параметров и частоты дискретизации базовой системы с динамическим хаосом при формировании сигналов с требуемыми статистическими характеристиками.

In this work, a simulation and study of a pseudo-random signal generator based on a multi-scroll system with chaotic dynamics according to the Jerk circuit was carried out for further use in straight-chaotic systems of digital information transmission. Engineering recommendations have been developed for the choice of parameters and sampling frequency of a basic system with dynamic chaos when generating signals with the required statistical characteristics.

Ключевые слова: динамический хаос, multi-scroll система, статистические характеристики, частота дискретизации.

Keywords: dynamic chaos, multi-scroll system, statistical characteristics, sampling frequency.

Использование в современных системах связи в качестве носителя информации хаотических сигналов имеет преимущества по сравнению с использованием гармонических сигналов: возможность управления режимами путем малых изменений параметров системы, большая информационная емкость, возможность самосинхронизации передатчика и приемника, конфиденциальность при передаче сообщений [1]. Одним из вариантов реализации генераторов хаоса является реализация генератора псевдослучайных сигналов на основе multi-scroll системы. В отличие от типовых радиоэлектронных систем с динамическим хаосом multi-scroll системы имеют более сложное динамическое поведение, что позволяет использовать их при построении конфиденциальных систем передачи информации. Эффективно построение генераторов псевдослучайных сигналов на основе multi-scroll систем с хаотической динамикой по схеме Jerk [2].

Цель работы – создание средств моделирования multi-scroll системы по схеме Jerk для дальнейшего исследования влияния вариации параметров и частоты дискретизации на работу моделируемой системы.

Один из широко используемых вариантов реализации схемы Jerk описывается системой уравнений [3]:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = z \\ \dot{z} = -x - y - a \cdot z + f(x), \end{cases}$$

где x, y, z – переменные системы; a – параметр системы; функция $f(x)$ определяет количество спиралей в фазовом пространстве исследуемой динамической системы.

Моделирование multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk в работе проведено на базе средств Mathcad. Численное решение нелинейной дифференциальной системы, описывающей динамику схемы Jerk, проводилось методом Эйлера.

Проведено исследование влияния вариации параметров multi-scroll системы по схеме Jerk на фазовые портреты и статистические характеристики сигналов, формируемых моделируемой системой с динамическим хаосом. Установлено, что для получения хаотического режима в системе при величине относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний, равной 0.09, рекомендуется выбирать значение базового параметра a в диапазоне: $0,3 \leq a \leq 1,1$ [4].

Полученные в результате моделирования характерные фазовые портреты multi-scroll системы для варианта с 4-мя, 6-ю и 8-ю спиральями при $a = 0.7$ представлены на рис.1.

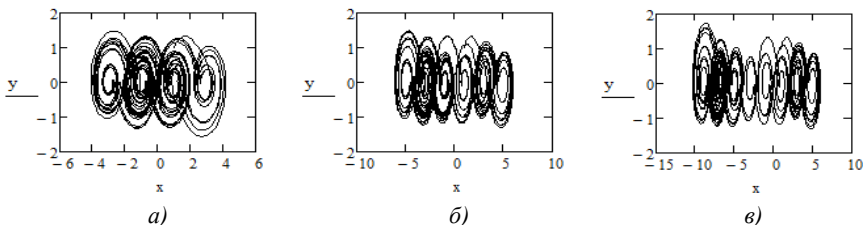


Рис.1. Фазовые портреты multi-scroll системы для случая: а) 4 спирали, б) 6 спиралей, в) 8 спиралей

Исследовано влияние вариации относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний, на фазовые портреты multi-scroll системы. Полученные в результате моделирования характерные фазовые портреты multi-scroll системы при значениях относительного шага временной дискретизации равных 0.05, 0.08, 0.15, значении параметра $a = 0.7$ и количестве шагов $n = 5000$ для случая с

4-мя спиралями представлены на рис. 2.

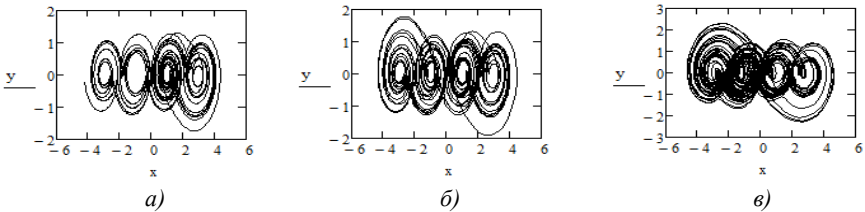


Рис.2. Фазовые портреты multi-scroll системы для случая: а) $h = 0.05$, б) $h = 0.08$, в) $h = 0.15$

Установлено, что требуемый хаотический режим в multi-scroll системе обеспечивается при выборе относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний, в диапазоне от 0.05 до 0.2 или при выборе частоты дискретизации в диапазоне от 25000 до 100000.

В работе исследованы статистические характеристики сигналов, формируемых на основе multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk. Полученные оценки типовых значений математического ожидания m , дисперсии D и СКО σ сигналов multi-scroll системы по схеме Jerk при различных значениях относительного шага временной дискретизации h приведены в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики сигналов multi-scroll системы по схеме Jerk

	$h = 0.05$	$h = 0.08$	$h = 0.15$
Сигнал X	$m = 0.445$ $D = 4.397$ $\sigma = 2.097$	$m = 0.115$ $D = 4.443$ $\sigma = 2.108$	$m = -0.528$ $D = 4.228$ $\sigma = 2.056$
Сигнал Y	$m = -0.021$ $D = 0.328$ $\sigma = 0.573$	$m = -4.41 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.345$ $\sigma = 0.588$	$m = -6.343 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.474$ $\sigma = 0.688$
Сигнал Z	$m = -4.541 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.316$ $\sigma = 0.562$	$m = -1.101 \cdot 10^{-3}$ $D = 0.327$ $\sigma = 0.572$	$m = -7.317 \cdot 10^{-4}$ $D = 0.44$ $\sigma = 0.664$

Для обоснования инженерных рекомендаций с оптимальным выбором параметров исследуемой multi-scroll системы в программной среде Multisim разработана и исследована модель схемы Jerk, выполненная на элементной базе ОУ. Схема состоит из 3-х блоков: блок интеграторов, буфер, генератор сигналов треугольной и пилообразной формы. С помощью блока интеграторов имеется возможность управления хаотическими режимами multi-scroll системы. Генератор сигналов треугольной и пилообразной формы регулирует количество спиралей в фазовом портрете исследуемой системы.

Полученный в результате моделирования multi-scroll системы характерный фазовый портрет для случая с 4-мя спиралями при параметре

$a = 0.7$ приведен на рис.3.

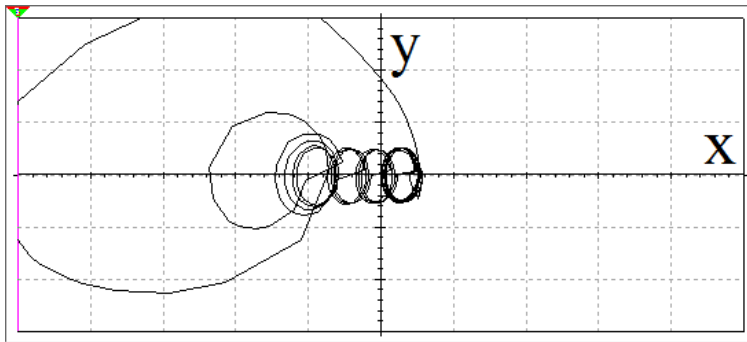


Рис.3. Фазовый портрет multi-scroll системы, полученный в программной среде Multisim

Таким образом, на основе разработанных средств моделирования в программах Mathcad и Multisim были исследованы фазовые портреты multi-scroll системы с хаотической динамикой по схеме Jerk и выработаны инженерные рекомендации по выбору параметров и частоты дискретизации базовой системы с динамическим хаосом. Исследованы статистические характеристики псевдослучайных сигналов, формируемых при моделировании multi-scroll системы, в зависимости от выбора относительного шага временной дискретизации, нормированного к периоду квазирезонансных колебаний. Полученные результаты исследования можно использовать при оптимизации аппаратуры цифровой передачи информации, построенной на основе эффектов динамического хаоса.

Список литературы

1. *Шахтарин, Б.И.* Генераторы хаотических колебаний/ Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондатьяев, С.В. Митин. - М.: Гелиос АРВ, 2007. - 248 с.
2. *Simin Yu.* N-scroll chaotic attractors from a general Jerk circuit/ Simin Yu, Jinhu Lu, Henry Leung, Guanrong Chen. - International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Kobe, Japan, 2015. - p. 1473-1476.
3. *Liu Chunxia.* Research on the multi-scroll chaos generation based on Jerk Mode/ Liu Chunxia, Yi Jie, Xi Xianchun, An Limin, Qian Yan, Fu Youngqing. - Procedia Engineering 29, 2012. - p. 957-961.
4. *Раупов, Р.Р.* Формирователи псевдослучайных сигналов по схеме Jerk для аппаратуры волоконно-оптических линий связи/ Р.Р. Раупов, В.В. Афанасьев. - VII Молодежная международная научно-техническая конференция «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы – 2020», 2020 – 616 с.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.