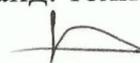


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники
Кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ИКТСС
канд. техн. наук, доц.


(подпись)

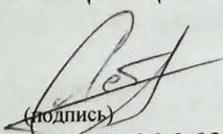
В. В. Никулин

«11» июня 2019 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЕМОГО ГЕНЕРАТОРА ХАОТИЧЕСКИХ
КОЛЕБАНИЙ С ТРАНСПОРТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ДЛЯ
СИСТЕМ ЗАЩИЩЕННОЙ СВЯЗИ**

Автор бакалаврской работы


(подпись)

10.06.19г.

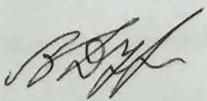
(дата)

М. А. Лебедев

Обозначение бакалаврской работы БР-02069964-11.03.02-11-19

Направление: 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Руководитель работы


(подпись)

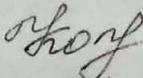
10.06.19г.

(дата)

В. С. Дубровин

канд. техн. наук, доц.

Нормоконтролер


(подпись)

10.06.19г.

(дата)

Е. А. Кошечая

канд. культурологии, доц.

Саранск
2019

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н. П. ОГАРЁВА»

Институт электроники и светотехники
Кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой ИКТСС
канд. техн. наук, доц.


В. В. Никулин
(подпись)

«15» декабря 2018 г.

ЗАДАНИЕ НА БАКАЛАВРСКУЮ РАБОТУ

Студент Лебедев Максим Алексеевич

1. Тема «Разработка управляемого генератора хаотических колебаний с транспортным запаздыванием для систем защищенной связи»

Утверждена приказом № 10335–с «14» декабря 2018 г.

2. Срок представления работы к защите 10 июня 2019 г.

3. Задание на выпускную работу:

3.1 Понятие о хаотических динамических системах

3.2 Условие возникновения хаоса в нелинейных динамических системах

3.3 Методы анализа хаотических колебаний

3.4 Особенности генераторов хаотических колебаний

3.5 Применение времени задержки в цепи обратной связи в генераторе хаотических колебаний

3.6 Особенности моделирования генераторов хаотических колебаний

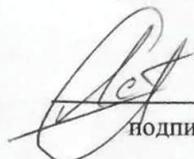
3.7 Моделирование генератора хаотических колебаний с транспортной линией задержки в цепи обратной связи

Руководитель работы
канд. техн. наук, доц.


17.12.18 г.
подпись, дата

В. С. Дубровин

Задание принял к исполнению


17.12.18 г.
подпись, дата

М. А. Лебедев

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 52 страницы, 19 рисунков, 22 формулы, 22 используемых источника.

УПРАВЛЯЕМЫЙ ГЕНЕРАТОР, ДИНАМИЧЕСКИЙ ХАОС, ВРЕМЯ ЗАДЕРЖКИ, ФАЗОВЫЕ ПОРТРЕТЫ.

Объектом исследования является управляемый генератор хаотических колебаний.

В настоящее время всё более широкое применение в системах скрытой передачи находят генераторы хаотических колебаний.

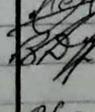
Хаотические сигналы имеют большую информационную емкость, поскольку являются, как правило, широкополосными и даже сверхширокополосными. Широкополосные системы связи позволяют также увеличить скорость передачи информации, повысить устойчивость системы при наличии возмущений, осуществить множественный доступ и возможность выполнения определенных правил частотного регулирования

Цель работы – проанализировать литературу по теме исследования, построить модель управляемого генератора хаотических колебаний.

В процессе работы использовался опыт современного эксперимента в области разработки генераторов хаотических колебаний для систем скрытой передачи.

В результате исследования изучена методика решения задачи, по разработке генератора хаотических колебаний с чистым транспортным запаздыванием в цепи обратной связи.

БР-02069964-11.03.02-11-19

Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Лит.	Лист	Листов
Разраб.		Лебедев		10.06.19			
Провер.		Дубровин		10.06.19		4	52
Реценз.							
Н. Контр.		Кошечкина		10.06.19			
Утверд.		Никулин		10.06.19			

Разработка управляемого генератора хаотических колебаний с транспортным запаздыванием для систем защищенной связи

ИЭС, ИКТСС, 431

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Понятие о хаотических динамических системах	9
1.1 Устойчивость	9
1.2 Нелинейность	11
1.3 Детерминированный хаос	11
1.4 Перемешивание	13
1.5 Гомоклиническая структура	14
1.6 Условие возникновения хаоса в нелинейных динамических системах	14
2 Методы анализа хаотических колебаний	16
2.1 Корреляционная функция	16
2.2 Автокорреляционная функция	17
2.3 Энергетический спектр	17
2.4 Математическое ожидание. Дисперсия	19
2.5 Показатель Ляпунова	20
2.5 Сечение Пуанкаре	21
3 Особенности генераторов хаотических колебаний	23
3.1 Генераторы с запаздывающей обратной связью	25
4 Применение времени задержки в цепи обратной связи в генераторе хаотических колебаний	27
4.1 Описание цифровой линии задержки	27
4.2 Описание блок–схемы генератора хаотических колебаний	28
5 Особенности компьютерного моделирования генераторов хаотических колебаний	32
5.1 Программы моделирования	33
6 Моделирование генератора хаотических колебаний с транспортной линии задержки в цепи обратной связи	36

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

6.1 Измерение ширины спектра хаотического сигнала	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	50

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

Динамический хаос – фундаментальное явление, открытое в поведении нелинейных систем в последней трети двадцатого века. Детальное исследование проводилось учеными разных направлений и специальностей и к началу 90–х годов превратилось их усилиями в зрелую область знаний. Концепция динамического хаоса вышла за рамки породившей ее теории нелинейных колебаний и стала новой общенаучной парадигмой, легла в основу нового научного направления, называемой синергетикой [1]. В то время перед исследователями и учеными стал вопрос об использовании этого явления в промышленности, медицине, бизнесе и других направлениях человеческой деятельности [2].

Кроме общенаучного и мировоззренческого интереса, динамический хаос представляет значительный интерес и обладает большими потенциальными возможностями в сфере прикладных исследований и разработок, прежде всего в радиофизике, электронике, системах передачи и защиты информации [1,2]. На сегодняшний день уже существуют достаточно большое количество работ по реализации систем скрытой передачи и использования в качестве несущей динамический хаос. Нелинейная динамическая система также нашла применение в автомобиле–, авиа– и судостроении, для учета таких явлений как, например, турбулентность [1, 3].

Точного математического определения понятия «хаос» на сегодняшний день не существует. В динамических системах чаще всего хаос определяется как непредсказуемое, непериодическое и сложное движение.

Несмотря на свойство непредсказуемости, хаос не случаен. Более того, он динамически детерминирован.

Существенная зависимость от начальных условий объясняет непредсказуемость хаоса. Даже самые незначительные ошибки при измерении параметров исследуемого объекта могут привести к абсолютно неверным

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

предсказаниям. Поэтому для хаоса присуще экспоненциальная зависимость [3].

Усилиями многих коллективов у нас в стране и за рубежом был пройден гигантский путь от экспериментального открытия этого явления, его осознания, первого этапа исследования, через пришедшее понимание того, что динамический хаос – явление вселенского в прямом смысле этого слова: оно присутствует не только в природе, но и в человеческом обществе – в искусственных объектах и системах [2].

					<i>БР-02069964-11.03.02-11-19</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

1 Понятия о хаотических динамических системах

Для понимания того, что же собой представляет детерминированный хаос, необходимо дать определения понятий детерминированность и хаос.

Под детерминированностью будем понимать некую определенность закона развития. Это означает, что, если состояние системы в начальный момент времени задано и оно известно, то состояние системы в последующие моменты времени будут однозначно определены [3].

Понятие хаос хорошо раскрыт в работах Анищенко В. С., где в качестве примера было описано поведение броуновской частицы в жидкости. В результате эксперимента были сделаны выводы о том, что движение частицы было неперiodическое, сложное и непредсказуемое. Более того, при попытке повторения опыта с одинаковыми начальными условиями траектория движения частицы была различной [4].

Парадокс заключается в том, что понятия детерминированность и хаос имеют противоположные значения и словосочетанию детерминированный хаос использовать не уместно. Однако для полного понимания необходимо разобраться с понятиями устойчивость и нелинейность [5].

1.1 Устойчивость

Под «системой» понимается совокупность качественно различных, достаточно устойчивых элементов, взаимно связанных сложными и динамическими отношениями.

Рассмотрение непрерывных нелинейных динамических систем (НДС) может быть описано через обыкновенные дифференциальные уравнения вида:

$$\frac{dx_j}{dt} = f_j(x_1, x_2, \dots, x_N), \quad (1.1)$$

где $j=1, 2, \dots, N$, или в векторной форме:

$$\frac{dx}{dt} = F(x), \quad (1.2)$$

где x – вектор с компонентами x_j , а $F(x)$ – вектор-функция с компонентами $f_j(x)$.

Совокупность N -мерных векторов x определяет состояние системы, которому ставится в соответствие точка в фазовом пространстве R^N . По движению фазовой точки можно будет судить об изменении состоянии динамической системы с течением времени. Фазовая траектория представляет собой траекторию движения точки, стартующая из начального состояния $x_0 = x(t_0)$ и отслеживаемая при $t \rightarrow \pm\infty$.

Состояние равновесия динамической системы характеризуются теми точками фазового пространства, при которых $f_j(x) = 0$, $j=1, 2, \dots, N$, остаются неизменными с течением времени. Если решение существует, то математическая задача об описании изменения динамической системы является корректной.

По изменениям начальных и (или) граничных условий параметра уравнения можно говорить об устойчивости или не устойчивости решений. Когда в некоторый начальный момент времени две фазовые траектории экспоненциально расходятся, то говорят о неустойчивости системы. Для сложных непериодических процессов присуще такое движение фазовых траекторий, что они не пересекаются и не замыкаются. Такое движение характерно для хаотических колебаний. Множество фазовых траекторий НДС, совершающие хаотические колебания, называют странным аттрактором.

Условием существования хаоса в непрерывной НДС считается то, что размерность ее фазовых траектория n должна превосходить 2, т.е. когда система описывается минимум тремя переменными [1, 2].

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.2 Нелинейность

Свойство нелинейной системы зависят от ее состояния. Пусть зависимость начального состояния x от амплитуды отклонения $f(x)$ определяется соотношением:

$$f(x) = kx - bx^3, \quad (1.3)$$

где k и b – постоянные положительные коэффициенты. При $x \ll 1$, получим:

$$f(x) \approx kx. \quad (1.4)$$

В случае (1.4) $f(x)$ линейно возрастает с увеличением x . В случае же (1.3) рост отклонения $f(x)$ за счет члена kx начнет испытывать нелинейное ограничение в силу вычитания величины bx^3 . При достижении x некоторого значения система будет регулировать саму себя автоматически, за счет того, что ее свойства будут зависеть от текущего состояния [1].

Если мы будем иметь дело с неустойчивым режимом, то любое малое воздействие системы будет приводить к нарастанию возмущения. При этом нарастания не будут происходить до бесконечности, пока не вступит в действие механизм нелинейного ограничения процесса нарастания возмущения. С физической точки зрения нарастания не могут происходить в силу ограниченности энергетических ресурсов, следовательно будет происходить уменьшение амплитуды отклонения [4, 5].

1.3 Детерминированный хаос

Рассмотрим двумерную дифференциальную динамическую систему. Если малое возмущение состояния равновесия будет увеличиваться, а при нелинейном ограничении уменьшаться, то возможны два варианта развития:

					БР-02069964-11.03.02-11-19	<i>Лист</i>
						11
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

либо переход в совершенно новый, но в периодический режим, либо в устойчивое состояние равновесия вблизи устойчивого.

На рисунке 1.1 и рисунке 1.2 показаны порождения устойчивых циклов φ .

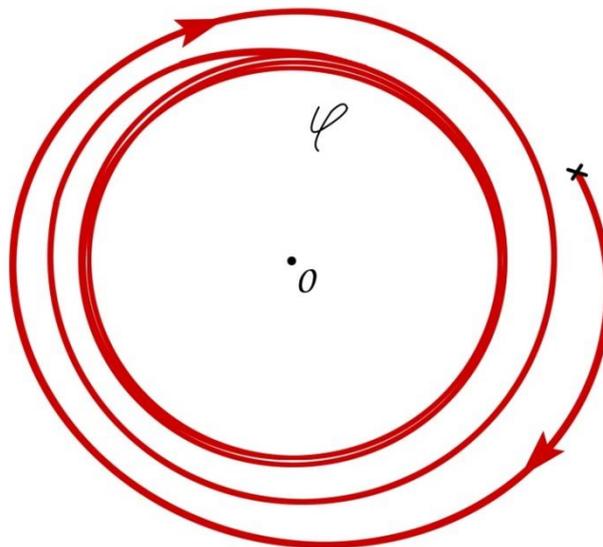


Рисунок 1.1 – Состояние динамической системы в некоторой окрестности, при значительном отклонении

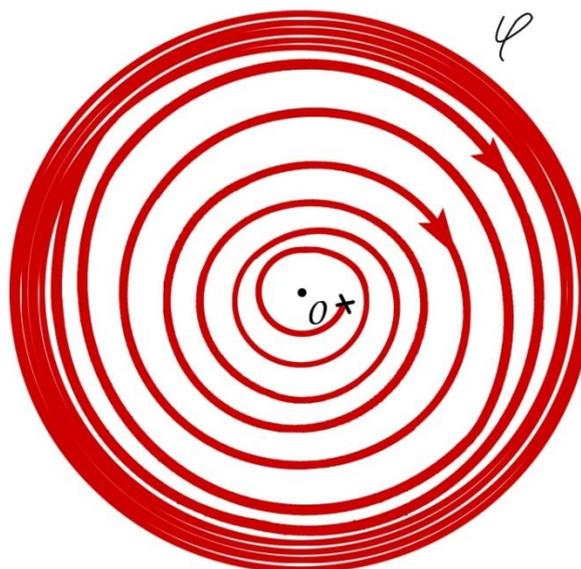


Рисунок 1.2 – Состояние динамической системы в некоторой окрестности, при незначительном отклонении

Периодическому режиму будет соответствовать рисунок 1.2, где траектория по спирали будет удаляться при малых отклонениях от точки равновесия O .

В случае же значительных отклонений (рисунок 1.1) траектория будет стремиться к точке равновесия. В итоге, вместо неустойчивого состояния равновесия возникает режим устойчивых периодических колебаний, которым соответствует предельный цикл φ на фазовой плоскости.

Если же продолжить эти рассуждения, при этом перейдя в динамическую систему, состоящую уже из трех независимых переменных, то можно получить два варианта поведения системы: либо через некоторое время траектория замкнется, демонстрируя наличие сложного, но периодического процесса, либо система будет описываться аperiodическим режимом. Именно второй случай, когда $t \rightarrow \infty$ будет соответствовать детерминированному хаосу [4].

1.4 Перемешивание

Свойство перемешивание присуще для неустойчивых режимов в детерминированных динамических системах с диссипацией энергии. С одной стороны неустойчивость будет приводить к увеличению фазового объема, с другой – диссипативная система будет наоборот, уменьшать объемы возмущения до нуля. Из этого будет следовать то, что в одном направлении фазовый объем будет растягиваться, в другом – сжиматься. Более того, для того чтобы фазовый объем уменьшился – необходимо чтобы степень сжатия была больше степени расширения [5].

Наличие же механизма нелинейного ограничения, который располагается в ограниченном объеме фазового пространства, заставляет объем возмущения двигаться вдоль траектории эволюции системы. Поэтому область возмущения будет двигаться по всей области, занятой траекторией системы [5].

Итак, для того чтобы предугадать исход будущего состояния система должна находиться в строго заданных начальных условиях. Если же будут

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

учитываться малые ошибки отклонения, то в силу свойств перемешивания – предсказание становится невозможным. Этот процесс будет ассоциироваться с «настоящим хаосом».

1.5 Гомоклиническая структура

Особую роль в возникновении хаоса играют гомоклинически структуры, которые могут быть изучены через общие методы теории нелинейной динамики. Такие структуры чаще всего встречаются как в диссипативных, так и консервативных системах [1].

Траектория, которая в фазовом пространстве системы имеет одну и ту же точку схождения называется гомоклинической траекторией. Из наличия хотя бы одной такой траекторией будет следовать бесконечное число их существований [5].

Существует также понятие гетероклиническая траектория, которая рассматривается как частные случаи гомоклинических траекторий. Отличие этих траекторий будет состоять в том, что эта траектория имеет разные точки схождения.

1.6 Условия возникновения хаоса в нелинейных динамических системах

В общем случае классическое описание динамической системы будет определяться выражением в виде разностного уравнения первого порядка:

$$x_{k+1} = f(a_k, x_0, x_k), \quad (1.5)$$

где x_0 – начальная точка; $k = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время; a_k – параметр управления, который может нести в себе информационные сообщения; $f(z)$ – функция определения типа отображения.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Начальное значение x_0 выведено в качестве отдельного аргумента, поэтому оно тоже может нести в себе информацию. Существуют также и многопараметрические одномерные отображения.

Последовательное повторение выражение (1.5) на x_0 будет называться итерацией. Циклом же будем называть моменты перехода конечных множеств x_k , под действием отображения f . Порядок – это длина цикла.

Для построения дискретных динамических генераторов хаотических колебаний используют дискретные отображения, для которых значения переменных соответствуют амплитуде, а номер итерации – безразмерному времени [1, 6].

					БР-02069964-11.03.02-11-19	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		15

2 Методы анализа хаотических колебаний

2.1 Корреляционная функция

В настоящее время существует два подхода к описанию хаотических сигналов. При первом подходе изучаются процессы, которые предполагаются как сложные, но детерминированные, реализуемые с помощью определенного алгоритма. В этом случае динамическая система описывается с помощью дифференциальных или разностных уравнений с заданными начальными условиями [1].

При втором подходе сигнал рассматривается как случайный, непредсказуемый процесс. В этом случае выявляются определенные статистические закономерности во временной структуре сигнала, сочетаний этих величин и т. д. Этот подход основан на хорошо развитом математическом аппарате, сочетающим математическую статистику и теорию вероятностей.

Рассмотрим статистические характеристики хаотических процессов.

Корреляционная функция характеризует статистическую зависимость двух процессов, отличающихся каким-либо параметром.

Для дискретных систем автокорреляционная функция (центральный корреляционный момент) определяется следующим образом:

$$R(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - x_{\text{CP}})(x_{n+k} - x_{\text{CP}}), \quad (2.1)$$

где x_{CP} – среднее значение амплитуды колебаний, k – временной сдвиг при единичном временном периоде дискретизации.

2.2 Автокорреляционная функция

Часто на практике используют автокорреляционную функцию (АКФ), которая определяется как среднее по некоторому временному интервалу T (при $T \rightarrow \infty$) произведений x , взятых в моменты t и $t + \tau$:

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt. \quad (2.2)$$

Автокорреляционная функция является достаточно эффективной характеристикой поведения рассматриваемой системы. Если с течением времени АКФ стремится к нулю и система не имеет устойчивых стационарных точек, то следует ожидать, что будет наблюдаться хаотический режим колебаний. Одним из критериев динамического хаоса будет являться стремление автокорреляционной функции к нулю [1].

Функция $x(t)$ считается аperiodической функцией времени, если динамическая система является хаотической. При этом спектр $x(t)$ будет непрерывным, т.к. автокорреляционная функция тесно связана со спектральной плотностью [2].

2.3 Энергетический спектр

О хаотичности движения можно судить по спектральной плотности (спектру) сигналов.

Спектр (спектральная плотность мощности или просто спектральная плотность) показывает распределение энергии сигнала по частотам и может быть вычислен при помощи преобразования Фурье:

					БР-02069964-11.03.02-11-19	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		17

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp[-j\omega t] dt, \quad (2.3)$$

где $x(t)$ – исходный сигнал, ω – частота.

Для компьютерных расчетов обычно применяют дискретное преобразование Фурье:

$$F_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp \left[-j \frac{2\pi kn}{N} \right], \quad (2.4)$$

где N – длина преобразуемой последовательности.

В настоящее время в расчетах используются преимущественно быстрое преобразование Фурье (БПФ). Возможности такого способа ограничены быстродействием процессора компьютера. Оценка спектра тем точнее, чем больший массив данных обрабатывается. Быстрое преобразование Фурье эффективное по быстродействию и аппаратным затратам алгоритм вычисления дискретного преобразования Фурье [1,2].

Характер спектральной плотности – один из самых простых и в то же время один из надежных критериев, используемый при анализе режимов колебаний. Рассчитывая ее численно или измеряя экспериментально, сравнительно легко определить, каким является поведение системы – периодическим, квазипериодическим или хаотическим. Например, если динамика системы не является регулярной, то соответствующий спектр будет сплошным или непрерывным.

Однако непрерывность спектра не означает, что детерминизм отсутствует. Сплошной спектр может быть признаком наличия детерминированных хаотических колебаний в системе. Это и используется при спектральном анализе движения динамических систем [1].

2.4 Математическое ожидание. Дисперсия

Поскольку некий хаотический сигнал можно рассматривать как случайный процесс, то совокупность всех возможных значений сигнала будет называться генеральной совокупностью, а отсчеты сигнала, зафиксированные в произвольной реализации длиной N – объем выборки. При многократном повторе опытов будут получаться различные конкретные выборки.

Важными числовыми характеристиками генеральной совокупности считается дисперсия и математическое ожидание. Приближенное значение математического ожидания генеральной совокупности дает выборочное среднее значение:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n. \quad (2.5)$$

Приближенное значение дисперсии генеральной совокупности дает выборочная дисперсия:

$$D = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x_n - \bar{x})^2. \quad (2.6)$$

Также к числовым статистическим характеристикам относится корреляционная функция.

При численном моделировании был сделан вывод о том, что хаотический сигнал в общем случае имеет ненулевое математическое ожидание.

Следовательно, для использования в качестве несущей или передачи данных хаотического сигнала необходимо, чтобы факт передачи не был установлен. Поэтому при проектировании систем связи чаще всего используют центрированный хаотический процесс, при котором среднее значение математического ожидания равнялась нулю.

2.5 Показатель Ляпунова

Для количественного определения средней устойчивости орбит на аттракторе используют Ляпуновские показатели. Теория ляпуновских характеристик в изучении стохастичности получила свою актуальность лишь с 70-х годов прошлого века. Именно в это время усовершенствовались алгоритмы, которые помогали рассчитывать весь спектр ляпуновских показателей [6].

Показатель Ляпунова определяется как скорость уменьшения взаимной корреляции между двумя реализациями процесса с близкими начальными условиями с течением времени.

Средняя скорость расходимости траекторий находится через соотношение:

$$\lambda = \lim \left(\frac{1}{t} \right) \ln \frac{d(t)}{d(0)}, \quad (2.7)$$

где $d(t)$ – расстояние между фазовыми траекториями в некоторый момент времени t , $d(0)$ – расстояние между фазовыми траекториями в начальный момент времени.

Для дискретных систем формула (2.7) преобразуется в соотношение:

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{d_n}{d_0} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=0}^{n-1} \ln \frac{df(x_i)}{dx_i} \right]. \quad (2.8)$$

Для определения ляпуновской размерности вводится понятия ляпуновские показатели, которые упорядочены следующим образом:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n. \quad (2.9)$$

Если, по меньшей мере, один из показателей будет положителен, то для странных аттракторов будет локализовано так называемое место расхожимости траекторий. При этом, чем больше показатель Ляпунова, тем быстрее расхожимость траекторий и тем более явный хаос. Это и делает количественным понятие чувствительности к начальным условиям [2].

Для диссипативных динамических систем сумма показателей Ляпунова всегда отрицательна.

Не менее важной характеристикой, показывающий переход дискретной системы в режим хаоса является бифуркационная диаграмма. Она определяется как зависимость амплитуды установившихся колебаний от величины управляющего параметра. Такая зависимость очень удобна для обнаружения квазипериодических, синхронизованных или стохастическими режимов колебаний. Достоинством такого метода является его экономичность с точки зрения ресурсов вычислительной техники [14].

2.6 Сечение Пуанкаре

Для того, что бы перейти от описания динамики в объеме к описанию динамики на плоскость французский математик А. Пуанкаре предложил метод сечения фазового пространства так называемой «поверхностью Пуанкаре».

Суть этого метода состоит в том, чтобы наблюдать не за движением фазовых траекторией целиком, а лишь за поведением точек на поверхности, которые получаются в результате пересечения ее траекториями. С течением времени будет возникать последовательность точек, характеризующая эволюцию системы [7].

Аналитическая обработка такой картины гораздо проще, чем при описании непрерывного трехмерного потока фазовых траекторий.

Изображения потока в упорядоченный каскад, проявляющееся на поверхности Пуанкаре точек – не взаимнооднозначен.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Можно провести аналогию с видеорядом: в качестве всей траектории возьмем всю дорожку видеоряда, а кадр – это поверхность Пуанкаре. Бывает так, что отдельно взятый кадр может быть более информативным, чем просмотр всего видеоряда.

На рисунке 2.1 изображен метод сечения Пуанкаре четырехоборотного предельного цикла.

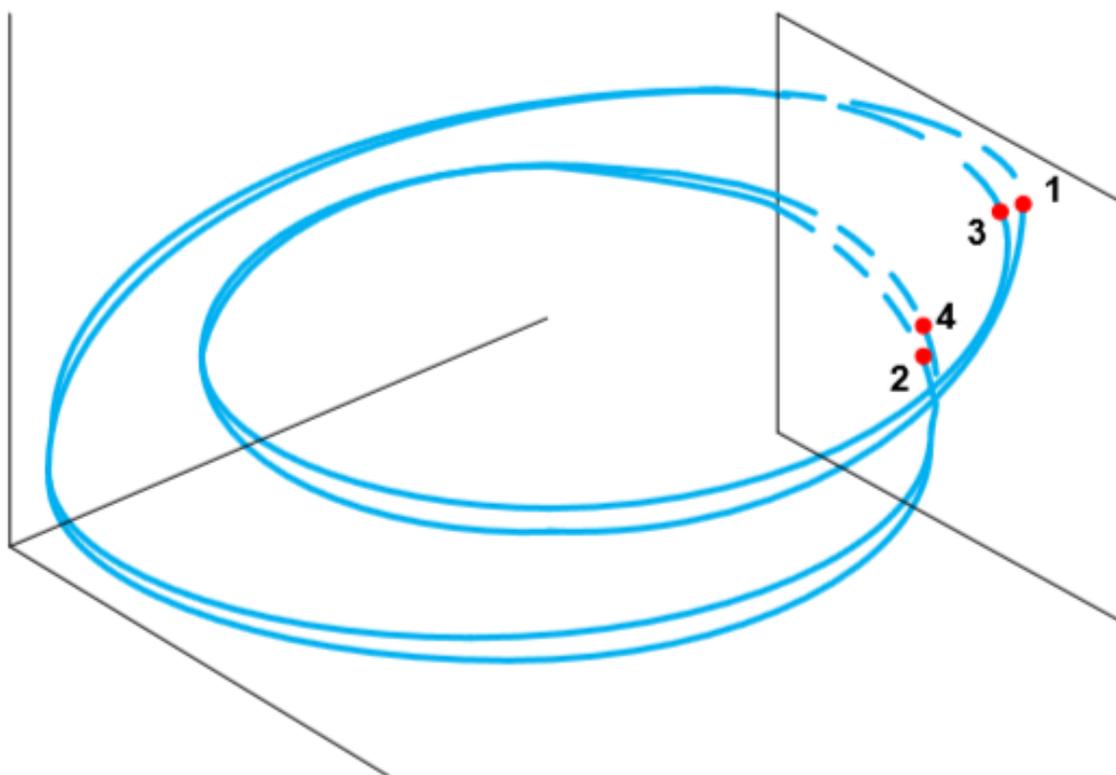


Рисунок 2.1– Сечение Пуанкаре четырехоборотного предельного цикла

Можно наблюдать, как после пересечения траекторией точки будут последовательно занимать положения, зафиксированные цифрами 1, 2, 3 и 4 соответственно. Таким образом, в терминах отображений, реализуется цикл периода 4.

По такому принципу организован метод построения бифуркационных диаграмм.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

22

3 Особенности генераторов хаотических колебаний

В настоящее время, большее внимание уделяется информационной безопасности. Применение методов шифрования в полной мере не решает задачу по обеспечению конфиденциальности.

Одним из методов по обеспечению скрытой передачи информации является метод, основанный на явлении в нелинейной динамике.

Как правило, хаотические сигналы являются широкополосными и даже сверхширокополосными. Большая скорость передачи информации, устойчивость систем при наличии возмущений, а также возможность передачи информации без потерь, при уровне шумов выше уровня полезных сигналов - все это говорит о достоинствах систем с применением динамического хаоса [3].

Последнее десятилетие характеризовалось большим интересом к применению хаоса для передачи информации в качестве несущих или модулируемых полезными сигналами колебаний [4].

Для разрабатываемых генераторов хаотических колебаний важным требованием является то, что передатчик и приемник должны содержать идентичные самосинхронизирующиеся ГХК, сигналы которых должны иметь равномерную спектральную плотностью [5].

В настоящее время существует обширное количество литературы, посвящённые различным вариантам построения генераторов хаотических колебаний.

Самой известной динамической системой для описания странных аттракторов является система Лоренца. Первое упоминание аттрактора приводилась во второй половине 20 века в работах Э. Лоренца, который описывал различные поведения систем физической природы, в частности изучал модели температурной конвекции в атмосферах. Впоследствии эта модель оказалось удобной для изучения турбулентности. Для этого была получена система из трех обыкновенных дифференциальных уравнений.

При определенных значениях параметров система проявляла хаотические свойства. Аттрактор Лоренца относится к классу псевдогиперболических (квазигиперболических) аттракторов и порождает робастный хаос, не разрушающийся при малом смещении по параметрам [12].

Одной из первых конструктивных схемы для демонстрации хаотических колебаний была предложена Леоном Чуа. В честь него был назван генератор Чуа, который является классическим образцом хаотического автогенератора. Благодаря этой схеме исследователи смогли обнаружить более 30 различных сценарий перехода к хаосу [12].

Также классическим представителем семейства генераторов хаоса является генератор Колпитца. Особенностью схемы является то, что он содержит один нелинейный элемент – биполярный транзистор. Было установлено и доказано, что в определенной области параметров транзисторный генератор переводился в режим хаоса, ассоциирующееся с существованием странного аттрактора. Более того хаотические колебания проявлялись в частотных диапазонах до нескольких гигагерц. Достоинством такого генератора являлась его устойчивость к изменению напряжения питания в достаточно широких диапазонах, что позволяло вводить информационный сигнал в плечо генератора с этим источником питания [2, 12].

Особый интерес представляют генераторы хаотических колебаний, с замкнутым в кольцо обратной связью линии задержки [5, 6].

Математические модели радиоэлектронных систем с хаотическим поведением можно описать с помощью обыкновенных дифференциальных уравнений или систем таких уравнений, дифференциально-разностными уравнениями, уравнениями в частных производных, с помощью передаточных функций [3].

Задача работы заключается в исследовании модели управляемого генератора хаотических колебаний с применением управляемой цифровой линии задержки в цепи обратной связи.

3.1 Генераторы с запаздывающей обратной связью

Системы, где взаимодействие каких-либо элементов происходят из-за запаздывания во времени, встречаются как в природе, так и в технике. Например, в теории автоматического управления или в нелинейной оптике [12].

Существование хаотических колебаний в динамических системах с запаздывающей обратной связью были теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены в ряде работ. Одним из простейших моделей такого типа систем были описаны дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -bx(t) + f(x(t - \tau)), \quad (3.1)$$

где τ – время задержки, $f(x)$ – нелинейный элемент.

Эта система включает в себя идеальный элемент задержки $e^{-p\tau}$, где p – оператор дифференцирования.

Динамические системы с запаздывающей обратной связью представляют собой дифференциально-разностные системы с бесконечным числом степеней свободы. Предполагается, что в уравнении (3.1) искомая функция $x(t) = \varphi(t)$ известна на участке $-\tau \leq t \leq 0$. Тогда на участке $0 \leq t \leq \tau$ функция $x(t - \tau)$ является также известной функцией t .

Обыкновенное дифференциальное уравнение можно получить путем замены $x(t - \tau)$ на функцию $\varphi(t - \tau)$ в уравнении (3.1). Используя вместо $x(t - \tau)$, полученное на предыдущем шаге решение, можно переходить к нахождению решения на отрезке $\tau \leq t \leq 2\tau$, определив $x(t)$ на участке $0 \leq t \leq \tau$. Динамика системы в таком случае будет усложняться с каждым шагом.

Реальное число шагов (степеней свободы) ограничено полосой пропускания Δf . Для определения решений на всей временной оси необходимо бесконечное количество «шагов» [1].

Например, даже в линейных колебательных контурах, где есть присутствие запаздывающей обратной связи, происходит генерация хаотических колебаний [2].

Для изучения нелинейных свойств в генераторах с запаздывающей обратной связью была разработана модель генератора Ван-дер-Поля. Возбуждение колебаний происходит лавинообразно, т.е. на каждой новой стадии активности стимулируется сигналом, порождённым сигналом на предыдущей стадии активности, который пришел с линии задержки, где изменяется за счет нелинейных преобразований совместно с вспомогательным внешним сигналом рабочей частоты [13].

					<i>БР-02069964-11.03.02-11-19</i>	<i>Лист</i>
						26
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

4 Применение времени задержки в цепи обратной связи как источник хаотических колебаний

4.1 Описание цифровой линии задержки

Цифровая линия задержки — цифровое устройство, предназначенное для задержки цифровых сигналов на определённый промежуток времени (фиксируемый, или изменяемый) [15].

Все достаточно доступные линии задержки, которые были созданы за последние восемь лет, можно условно разделить на две группы - цифровые линии задержки с аналоговым управлением и цифровые линии задержки с цифровым управлением.

Основные параметры линии задержки:

- разрядность цифрового кода;
- максимальная частота дискретизации;
- число отводов;
- возможность управления;
- напряжение питания;
- максимальное время задержки.

Цифровая линия задержки может быть реализована на сдвиговом регистре, либо на устройстве памяти с мультиплексором.

В простейшем случае цифровая линия задержки представляет собой оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в каждом такте из некоторой ячейки которого считывается ранее записанное значение, которое выдается на выход. После чего в данную ячейку заносится текущее значение на входе, и адрес ячейки увеличивается на единицу. После достижения последней ячейки, адресуется первая; иначе говоря, множество ячеек является закольцованным.

Длительность задержки, таким образом, зависит от тактовой частоты (количества выборок/перезаписей в секунду) и количества адресуемых ячеек.

В случае работы с аналоговым сигналом, перед входом в линию задержки он преобразуется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), а на

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		27

выходе из линии (при необходимости) — обратно в аналоговый вид при помощи цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) [15].

4.2 Описание блок-схемы генератора хаотических колебаний

За основу был выбран управляемый генератор квадратурных гармонических колебаний [10].

Блок-схема генератора хаотического сигнала, представленная на рисунке 4.1, содержит колебательную систему (КС), линию задержки (ЛЗ), датчик напряжения (ДН), релейный элемент (РЭ), схему сравнения (СС) и перемножитель (ПМ). Колебательная система содержит два последовательно соединенных и замкнутых в кольцо управляемых интегратора и инвертирующий сумматор [8].

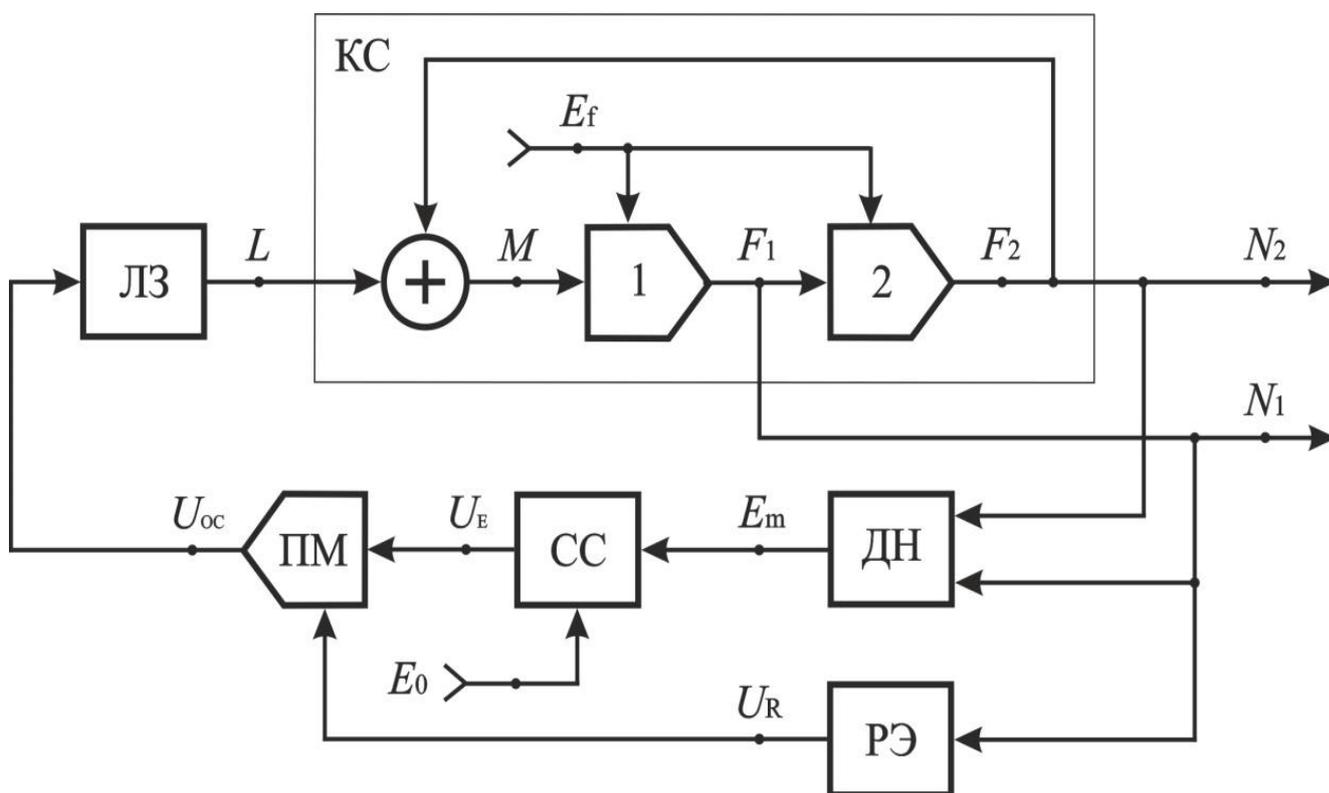


Рисунок 4.1 – Блок-схема генератора хаотических колебаний

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

28

При отсутствии линии задержки, то есть при подаче сигнала с выхода ПМ непосредственно на вход КС, устройство работает как управляемый генератор гармонических колебаний (ГГК).

Стабилизация амплитуды выходных колебаний осуществляется [10, 11] с помощью датчика напряжения ДН, релейного элемента РЭ, схемы сравнения СС и перемножителя ПМ (рис. 4.1).

Релейный элемент, имеющий нелинейную характеристику с фиксированным пороговым ограничением U_0 , выполнен из усилителя–ограничителя. Поэтому на выходе формируется сигнал F_0 .

Быстродействующий (безынерционный) датчик напряжения, а также наличие релейного элемента РЭ и перемножителя ПМ обеспечивают высокое быстродействие генератора в переходных процессах, как в пусковом режиме, так и при изменении частоты (вверх/вниз) в широких пределах.

Наличие двух астатических звеньев (интеграторов) в системе автоматического регулирования, то есть в режиме стабилизации амплитуды выходных сигналов ГГК, сводит ошибку регулирования практически к нулю $U_e = 0$.

Величина управляющего напряжения E_f задает [5] частоту f_0 формируемых сигналов $N_1(t)$ и $N_2(t)$:

$$f_0 = E_f / (2\pi\tau), \quad (4.1)$$

где τ – постоянная времени интегрирующих усилителей, входящих в КС.

Управляемый ГГК может работать в диапазоне частот в одну или две декады [8-10] при изменении управляющего напряжения от E_{fmin} до E_{fmax} .

Квадраторы, совместно с инвертирующим суммирующим блоком, выполняют роль быстродействующего (безынерционного) датчика напряжения (ДН).

При подаче на третий вход сумматора опорного напряжения E_m происходит сравнение (суммирование) двух сигналов, в результате чего формируется сигнал

рассогласования U_e . На выходе релейного элемента формируется сигнал

$$F(t) = U_0 \text{sign}[N_1(t)], \quad (4.2)$$

где U_0 – порог ограничения релейного элемента. В результате перемножения двух сигналов $U_e(t)$ и $F(t)$ формируется сигнал $V(t)$, поступающий на вход ЛЗ.

При включении линии задержки генератор можно перевести в режим возбуждения хаотических колебаний. Линию задержки ЛЗ можно рассматривать как идеальный четырехполюсник с передаточной функцией:

$$H_{\text{ЛЗ}}(s) = \frac{U_{\text{OC}}(s)}{M(s)} = \exp[-\tau_{\text{ЛЗ}}], \quad (4.3)$$

где $\tau_{\text{ЛЗ}}$ - время задержки.

Введение в схему ЛЗ не изменяет модуль (коэффициент передачи) разомкнутой системы, но существенно влияет на результирующую фазочастотную характеристику (ФЧХ):

$$\varphi_{\text{ЛЗ}}(\omega) = -2\pi \cdot f \cdot \tau_{\text{ЛЗ}}. \quad (4.4)$$

Введение в кольцо обратной связи задержки придает системе многочастотный характер, поскольку баланс фаз будет выполняться уже для нескольких частот, включая и основную частоту.

Схемотехническая реализация звена чистого запаздывания встречает значительные трудности, поэтому на практике используют различные методы аппроксимации экспоненциальной функции, среди которых широкое применение нашли ряды Паде. При этом экспонента заменяется дробной функцией с полиномами одинаковой степени в числителе и знаменателе.

Степень приближения к идеальному звену чистого запаздывания зависит от числа слагаемых n ряда.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

При $n = 1$ получим приближенную замену запаздывающего звена звеном с передаточной функцией:

$$H_1(s) = \frac{(2 - \tau_{ЛЗ} \cdot s)}{(2 + \tau_{ЛЗ} \cdot s)}. \quad (4.5)$$

Приведем соотношение (4.5) к следующему виду:

$$H_1(s) = \frac{(1 - T_э \cdot s)}{(1 + T_э \cdot s)}, \quad (4.6)$$

где $T_э = \tau_{ЛЗ}/2$ – эквивалентная постоянная времени запаздывающего звена.

Модуль комплексной частотной характеристики (КЧХ) не зависит от частоты и равен единице, а фазовый сдвиг:

$$\varphi_1(\omega) = -2 \arctg(\pi \cdot f \cdot T_э). \quad (4.7)$$

Управлять хаотическими колебаниями в генераторе можно с помощью изменения постоянной времени $\tau_{ЛЗ}$, управляющего E_f и опорного E_0 сигналов, а также с помощью изменения коэффициента передачи КС по информационному входу.

5 Особенности моделирование генераторов хаотических колебаний

Поскольку динамический хаос – явление нелинейное, то решения в замкнутом аналитическом виде получить достаточно проблематично, в силу чувствительности к начальным условиям и непредсказуемости траекторий. Когда идея о созданиях генераторов хаоса только начала зарождаться, не было ни доступной базы о понятиях «динамическая система», ни мощных компьютеров. Поэтому первые модельные представления о генерациях шумоподобных колебаниях в электронных устройствах носили описательный характер. Лишь к 1974 году усилиями советских ученых и инженеров была разработана первая математическая модель шумотрона, которая в дальнейшем помогла описать явление и понять его природу [2].

На сегодняшний день с развитием вычислительной техники в совокупности с методами развития качественной теории нелинейной динамики исследование динамических систем с хаотическим поведением является доступной. Численное моделирование на компьютере считается общей схемой исследования любой динамической системы со сложными процессами [1, 2].

Методы компьютерного моделирования можно поделить на две группы: аналитические и имитационные. К первому случаю относятся относительно простые системы, в основе которых лежат обычные математические законы, например, дифференциальные уравнения, которые при определенных допущениях решаются аналитически. Но для моделирования «реальных» систем используют метод имитации, суть которой заключается в создании компьютерной «имитации» какого-то явления или процесса [15].

Различают детерминированные и стохастические (вероятностные) модели. На детерминированную модель не влияет воздействие случайных процессов. Поэтому для набора входных параметров существует определяемый набор выходных параметров.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Если величина определяется через некоторые вероятностные характеристики, то говорят о стохастической модели [16].

Многие программы позволяют автоматизировать все стадии проектирования электронных устройств, включая подготовку принципиальных схем, моделирование процессов в аналоговых и цифровых цепях, компоновку и трассировку печатных плат, редактирование и расширение библиотек компонентов [16].

5.1 Программы моделирования

Для того чтобы убедиться в правильности и работоспособности генератора хаотических колебаний необходимо произвести моделирование в специально предназначенных программных средах. На сегодняшний день предлагается большой выбор программ моделирования. С их помощью удастся проверить, удовлетворяют ли спроектированное устройство требованиям технического задания при использовании реальных компонентов с характеристиками, отличными от идеальных.

LabVIEW – представляет собой мощную и гибкую среду графического программирования, которая находит применение в самых разнообразных сферах человеческой деятельности. Данная система дает возможности в разработке прикладного программного обеспечения для организации взаимодействия с измерительной и управляющей аппаратурой, сбора, обработки и отображения результатов, а также моделирование не только автоматизированной системы в целом, но и отдельных ее объектов.

Концепция LabVIEW сильно отличается от последовательной природы традиционных языков программирования. Благодаря графическому языку программирования LabVIEW, именуемого «G» (от англ. Graphical - графический), задача программирования сводится к написанию графической блок-диаграммы, которая компилирует алгоритм в машинный код.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

Достоинством данной программы являются:

- 1) интуитивно понятный процесс графического программирования;
- 2) широкие возможности сбора, обработки и анализа данных, управления приборами, генерации отчетов и обмена данных через сетевые интерфейсы;
- 3) высокая скорость выполнения откомпилированных программ;
- 4) возможность включение разрабатываемых приложений в программные модули, написанные на других языках программирования.

Благодаря своей гибкости и масштабируемости, LabVIEW может использоваться на всех этапах технологического процесса: от моделирования и разработки прототипов продуктов до широкомасштабных производственных испытаний [17].

NI Multisim – программа, созданная для совместной разработки электронных устройств и тестирования на базе технологии виртуальных приборов для учебных и производственных целей. Усилиями разработчиков компании National Instruments помогло пользователям совместно использовать пакеты Multisim и LabVIEW, которые позволяют сравнивать теоретические данные с реальными в процессе создания схем.

Программный пакет предоставляет такие возможности как: расчет и анализ схем по постоянному и переменному току, расчет переходных характеристик, анализ шума, Фурье-анализ и т.д. [18].

MicroCAP является универсальной пакетной программой схемотехнического моделирования устройств светотехники. Возможности данной программы достаточно велики, несмотря на скромные требования операционной системы.

Основные виды анализов:

- 1) расчет режимов по постоянному и переменному току;
- 2) анализ шумов и параметров чувствительности;
- 3) анализ реакции во временной области при произвольных входных воздействиях;
- 4) статический анализ методом Монте–Карло.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		34

Одной из достоинств является возможность анализа параметров моделей аналоговых элементов по результатам экспериментов [19].

Многофункциональная программа Electronics Workbench создана для симуляции различных электронных схем; позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой степени сложности. Также программа имеет широкий набор приборов, которые позволяют производить измерение различных величин, задавать входные воздействия.

Достоинством данной программы является возможность подключения и создания новых библиотек компонентов. Все компоненты описываются строго установленными параметрами, поэтому каждый раз в процессе экспериментов будут повторяться результаты, определяемые только параметрами элементов и алгоритмов расчета [20].

PSIM – программа, разработанная для моделирования устройств электроники. Она имеет достаточно понятный и удобный графический интерфейс. Разработка отдельных устройств и систем в целом для телекоммуникационных приложений возможна благодаря существующим наборам библиотек. Для решения дифференциальных уравнений используется принцип трапеций, благодаря чему обеспечивается высокое быстродействие, при достаточно высокой точности вычисления. При этом шаг интегрирования может подбираться автоматически.

По заявлению разработчиков программа обеспечивает решение проблем сходимости, присущие другим программам схемотехнического моделирования.

Особенностью данной программы является:

- 1) расчет как частотных, так и временных характеристик;
- 2) простота использования;
- 3) совместимость работы с пакетом Matlab.

Наиболее полно, с точки зрения поставленных целей исследования, является вариант выбора программной среды PSIM [21].

6 Моделирование генератора хаотических колебаний с транспортной линией задержки в цепи обратной связи

В данной работе предлагается управлять хаотическими колебаниями с помощью изменения времени задержки $\tau_{лз}$.

Блочно–принципиальная схема представлена на рисунке 5.1.

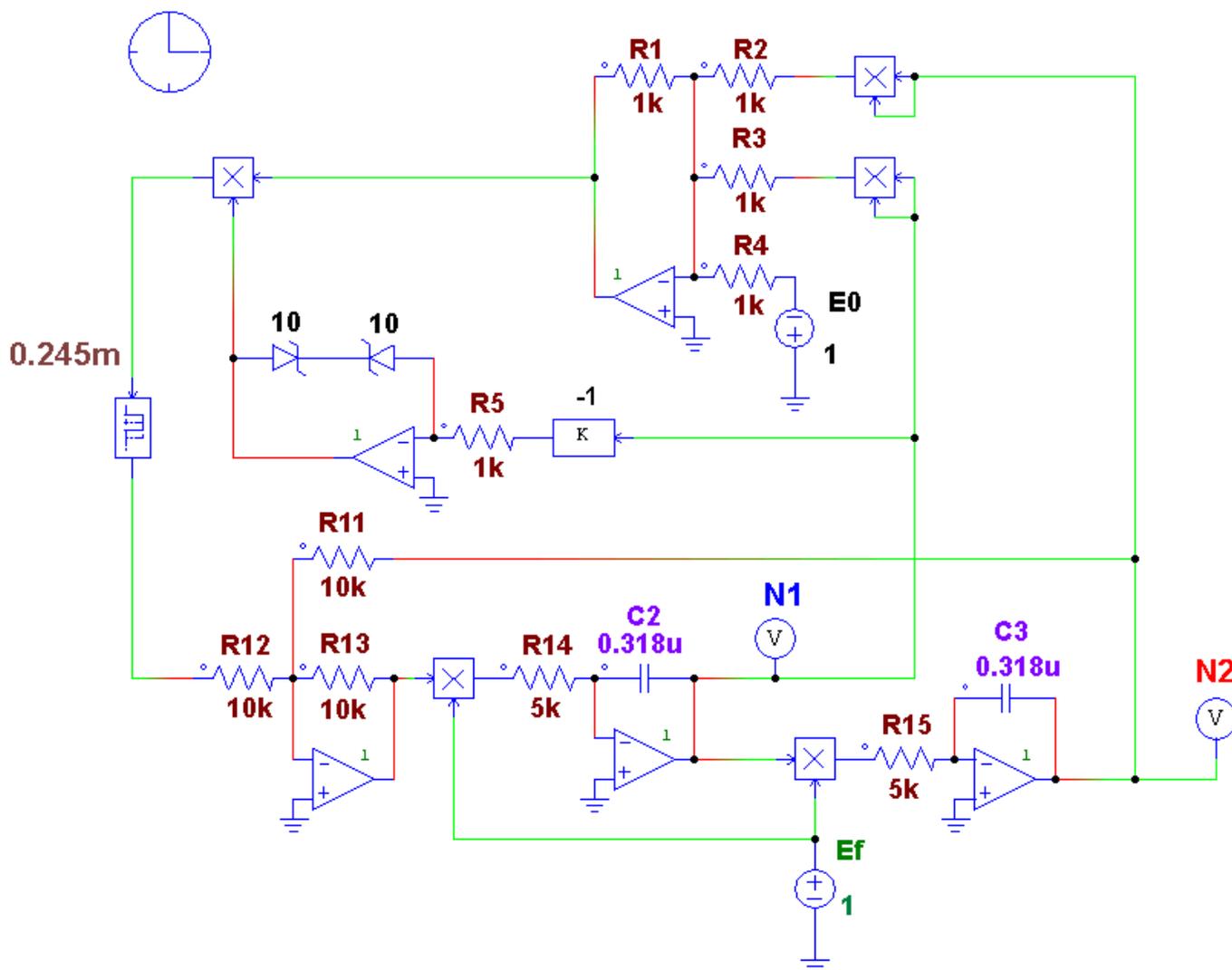


Рисунок 5.1 – Блочно-принципиальная схема генератора хаотических колебаний

Как было сказано выше, для того чтобы перевести данный генератор в режим хаотических колебаний необходимо добавить линию задержки в цепь обратной связи. Теперь осталось определить – на каком диапазоне времени задержки будет наблюдаться хаотический режим.

Для правильного нахождения такого диапазона необходимо зафиксировать параметры управления генератора. Пусть будут зафиксированы такие параметры как:

- величина управляющего напряжения $E_f = 1$ В;
- величина опорного напряжения $E_0 = 1$ В;
- постоянная времени интегрирующего усилителя $\tau_0 = 1,59$ мс;
- коэффициент усиления $\alpha = 1$.

В ходе работы было обнаружены критические значения $\tau_{лз(мин)}$ и $\tau_{лз(макс)}$.

Так на примере рисунка 5.2 можно наблюдать качественный переход генератора из периодического режима в квазипериодический при $\tau_{лз(мин)} = 0,224$ мс. При этом на рисунке 5.3 будет наблюдаться фазовый портрет типа «цикл периода 3»

Так называемый «срыв» хаотического режима происходил при $\tau_{лз(макс)} = 0,310$ мс.

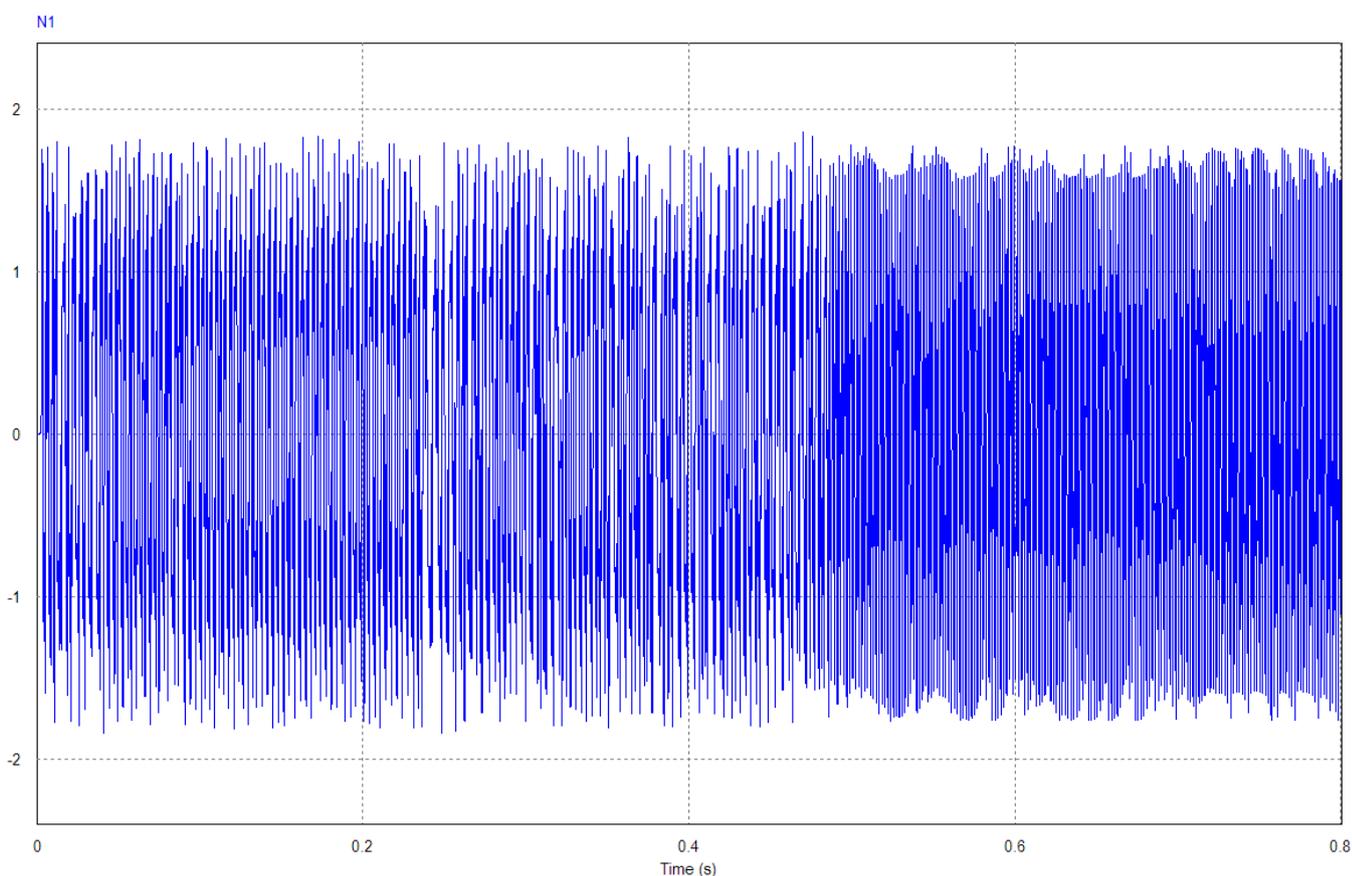


Рисунок 5.2 – Временные характеристики при $\tau_{лз(мин)} = 0,224$ мс

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

37

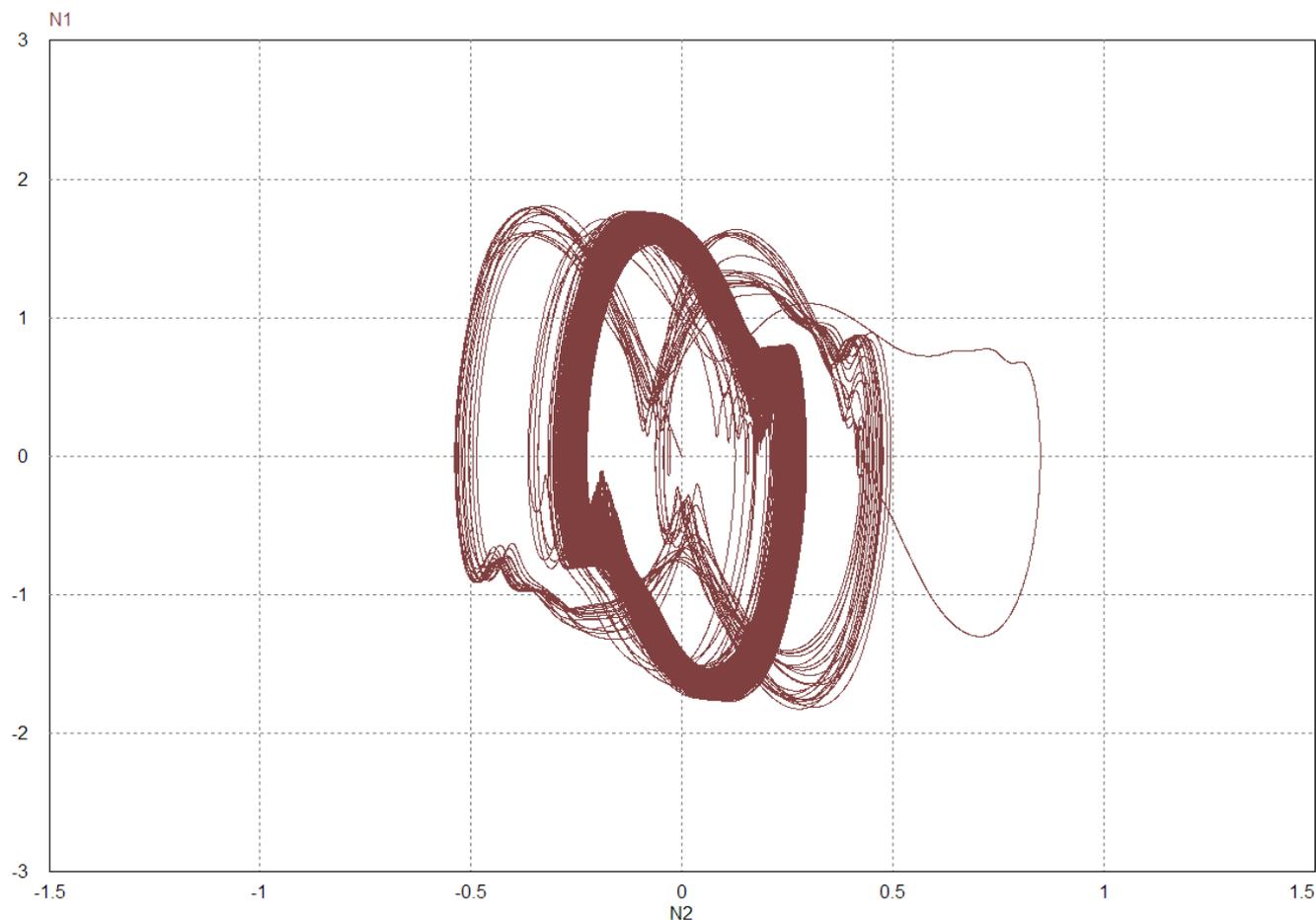


Рисунок 5.3 – Фазовый портрет типа «цикл периода 3»

В качестве примера на рисунке 5.4 и рисунке 5.5 изображены временные характеристики формируемого хаотического сигнала N_1 при следующих значениях времени задержки: $\tau_{дз1}=0,245\text{мс}$; $\tau_{дз2}=0,305\text{мс}$.

Из временных характеристик сигнала N_1 видно, что амплитуда и форма сигнала являются случайными колебаниями [3].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

38

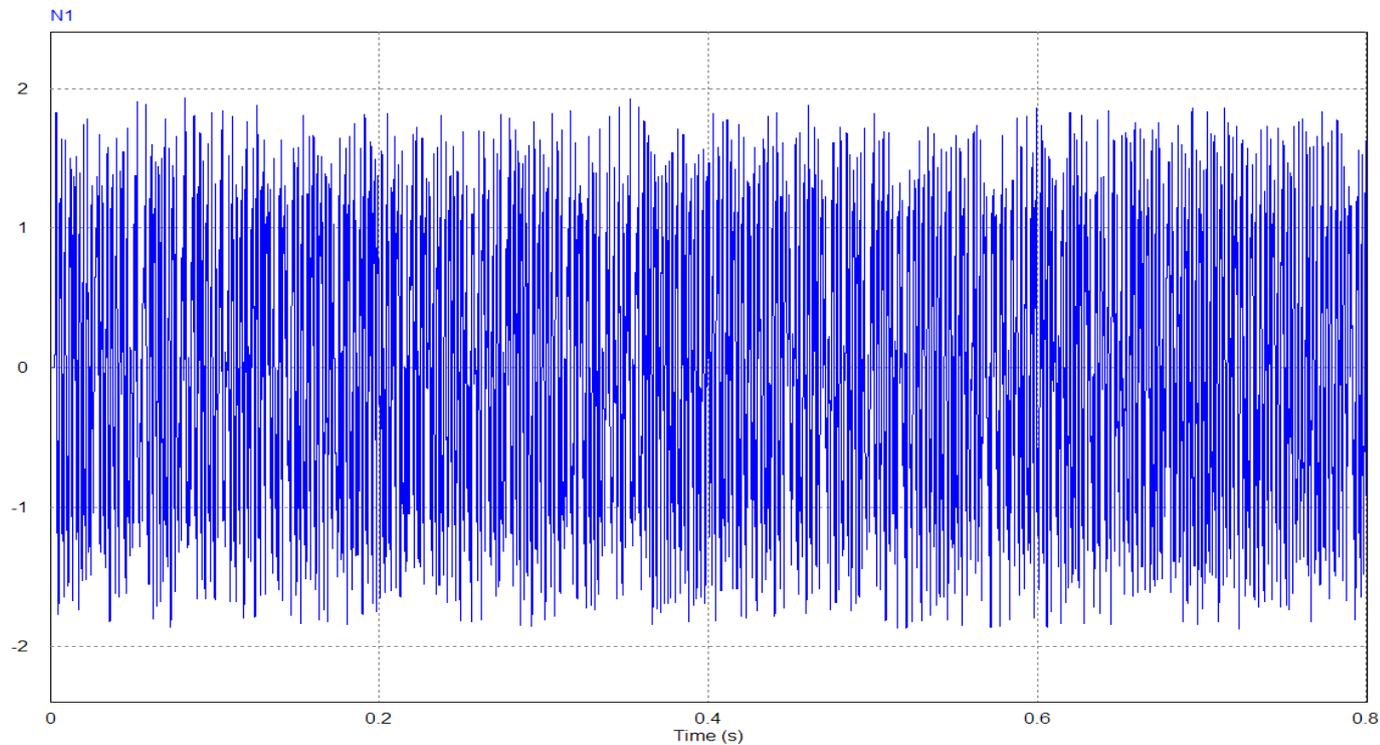


Рисунок 5.4 – Временные характеристики при $\tau_{L31}=0,245$ мс

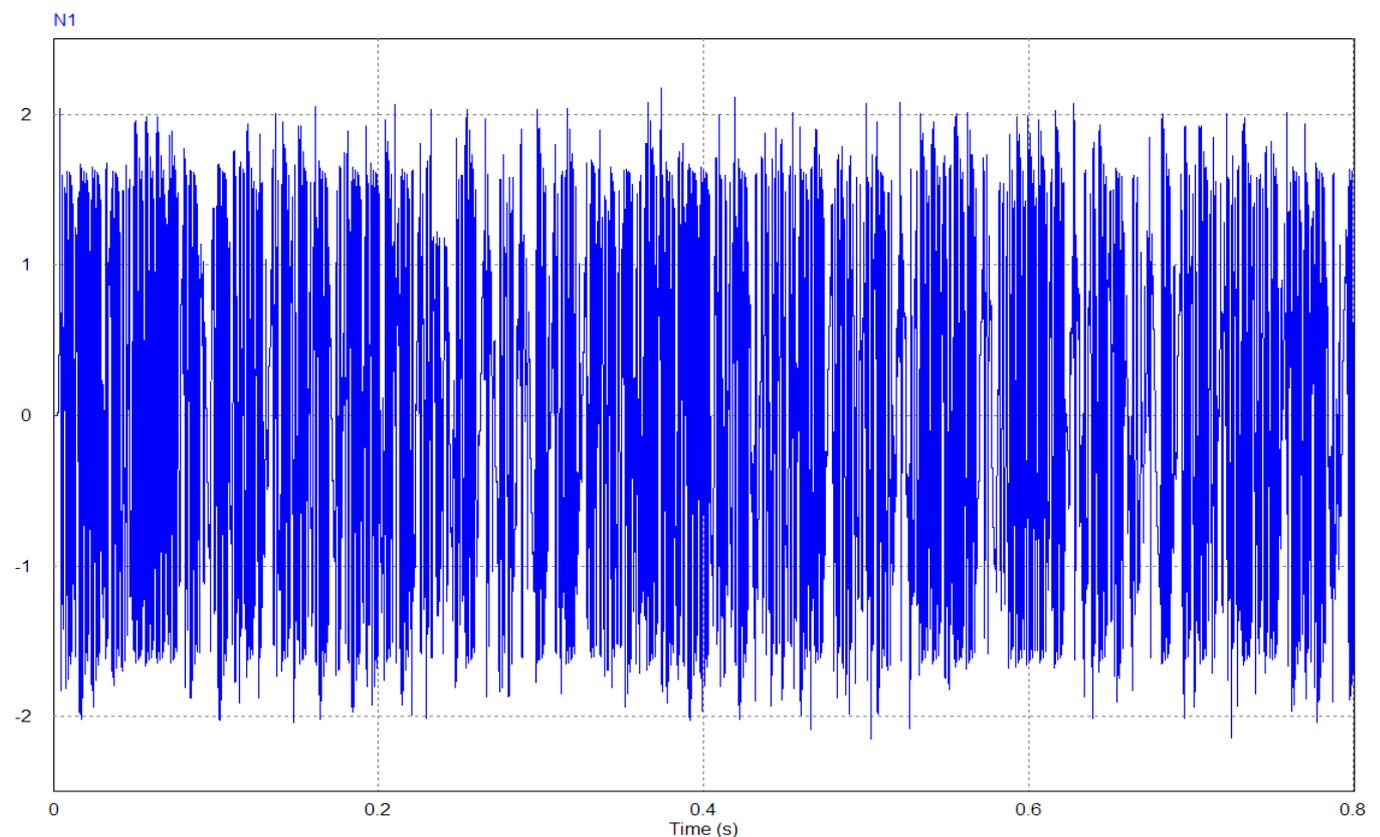


Рисунок 5.5 – Временные характеристики при $\tau_{L32}=0,305$ мс

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

39

По спектральным характеристикам, где по оси частот отложены в логарифмическом масштабе, видно, что основная область спектра смещается в область более высоких частот. Спектр – сплошной, который не содержит выраженных дискретных составляющих.

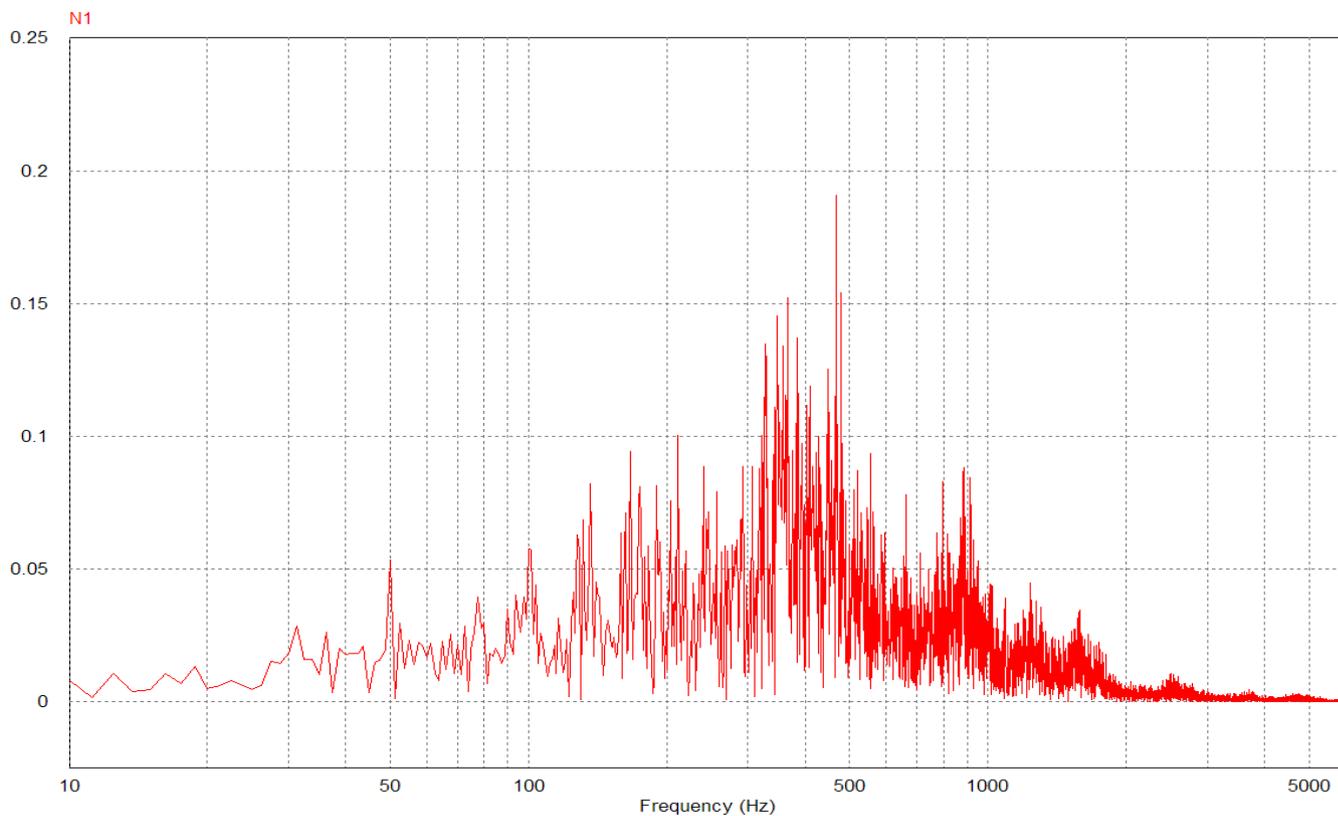


Рисунок 5.6 – Спектральные характеристики при $\tau_{лз1}=0,245$ мс

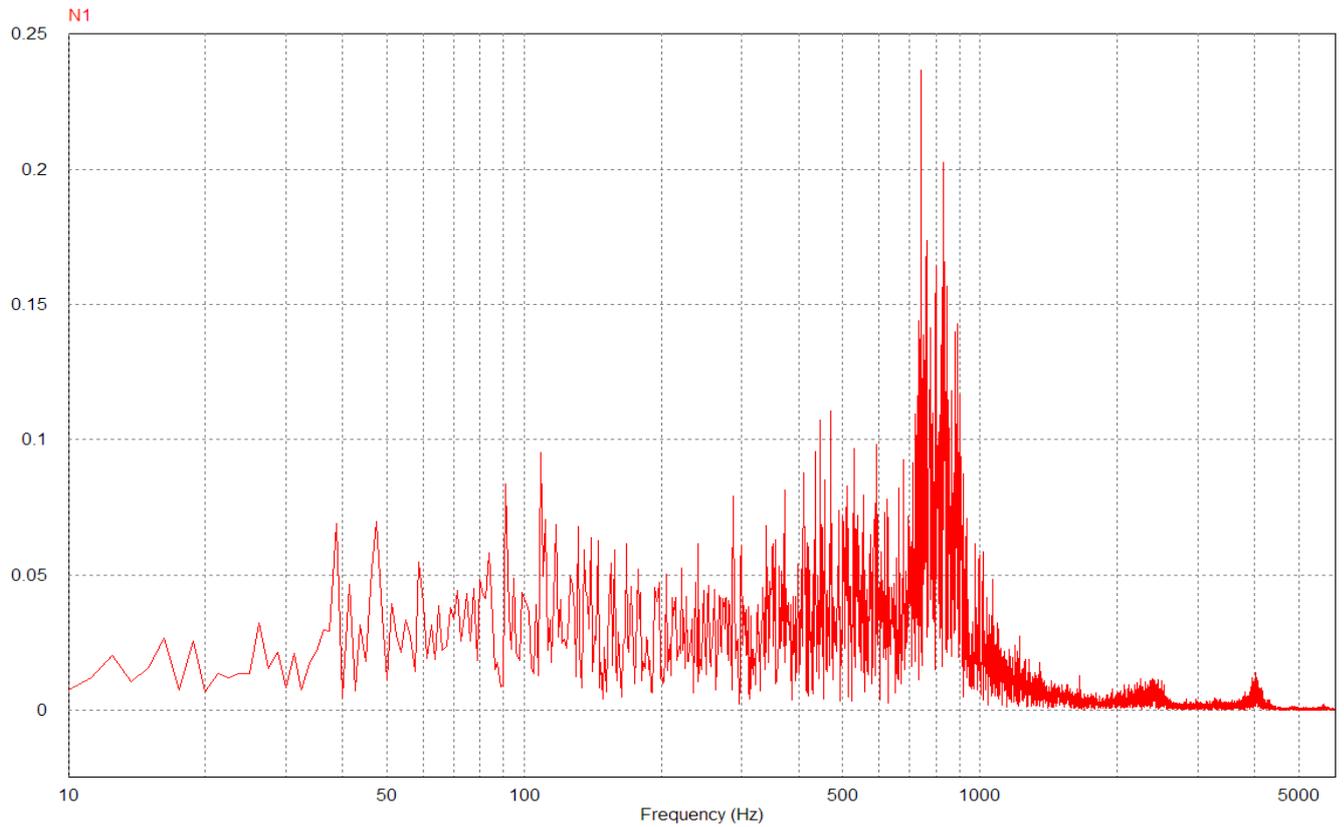


Рисунок 5.7 – Спектральные характеристики при $\tau_{\text{ЛЗ2}}=0,305$ мс

Проекция фазовых портретов, которые представляют собой странные аттракторы, демонстрируют увеличение амплитуды колебаний, что приводит к усложнению хаотических колебаний [8].

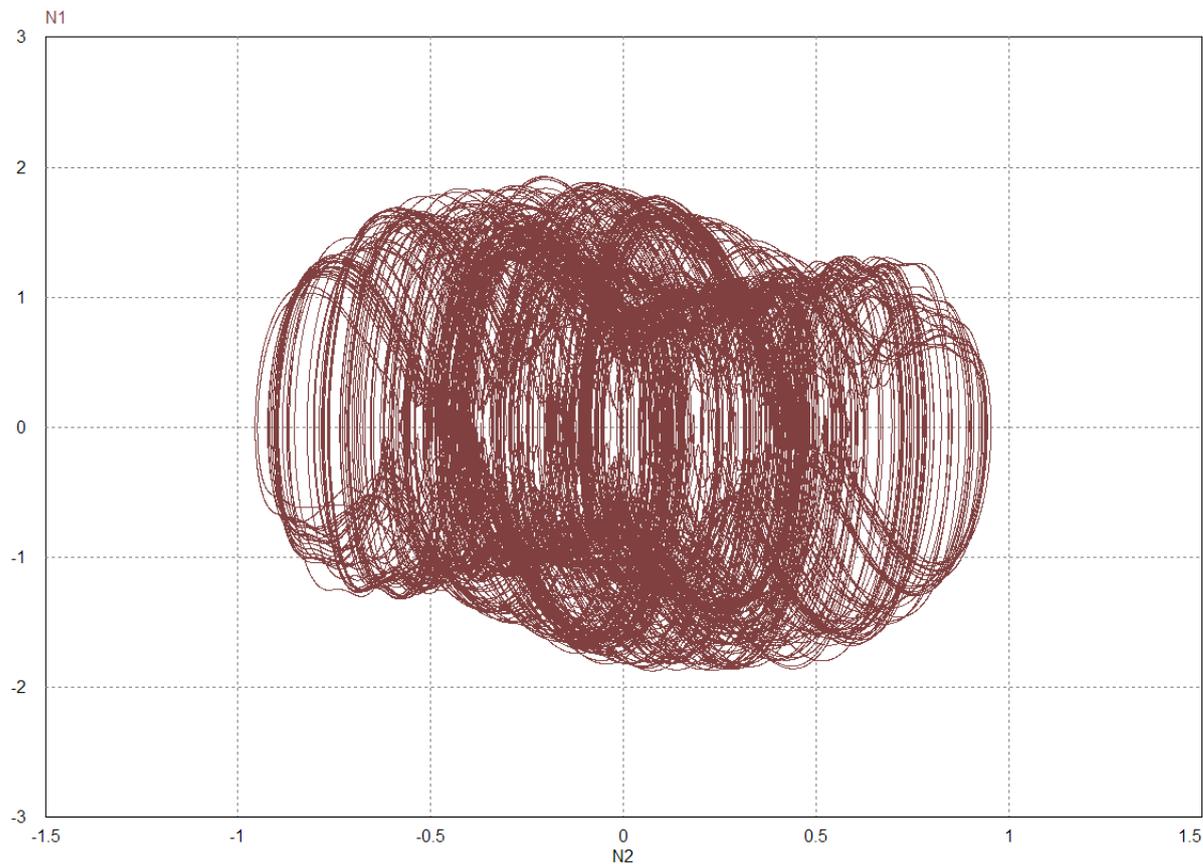


Рисунок 5.8 – Фазовые портреты при $\tau_{ЛЗ1}=0,245$ мс

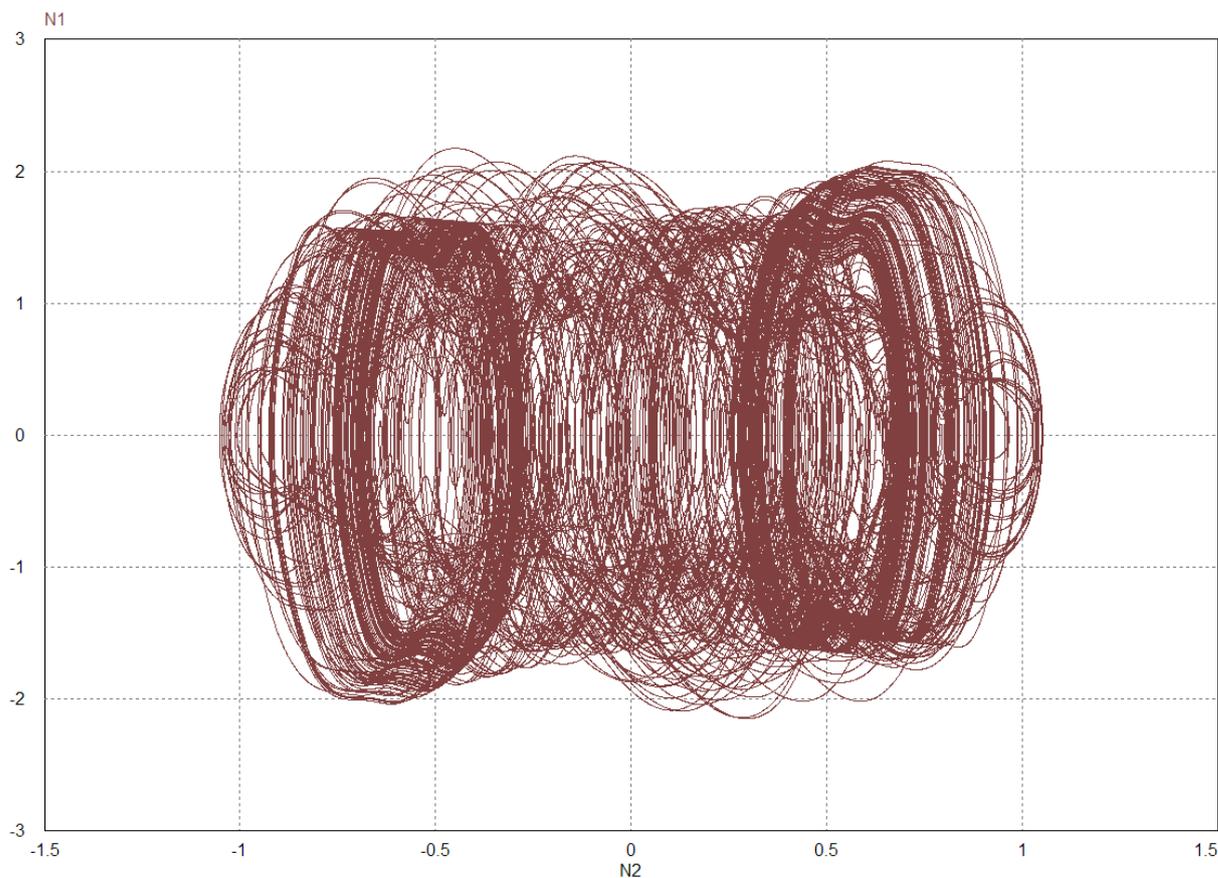


Рисунок 5.9 – Фазовые портреты типа «двойной завиток» при $\tau_{ЛЗ2}=0,305$ мс

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

42

Для построения графиков корреляционной функции необходимо работать с большими массивами данных. Для этих целей была выбрана программа DIAdem 18. Она оптимизирована для больших наборов данных и включает инструменты, которые помогут искать нужные данные, просматривать и исследовать эти данные, преобразовывать их с помощью инженерных функций анализа и обмениваться результатами с помощью мощного редактора отчетов. С помощью этой программы возможно строить различные графики функции, включая спектральную, взаимнокорреляционную и многие другие функции [22].

Для начала работы с данной программой необходимо принести данные временной реализации из программы PSIM.

Например, корреляционные функции двух сигналов при $\tau_{лз1}=0,245$ [мс] и $\tau_{лз2}=0,305$ [мс] представлены на рисунках 5.10 и 5.11. Построение проводился в программной среде DIAdem 18 с помощью встроенной функции Analysis.

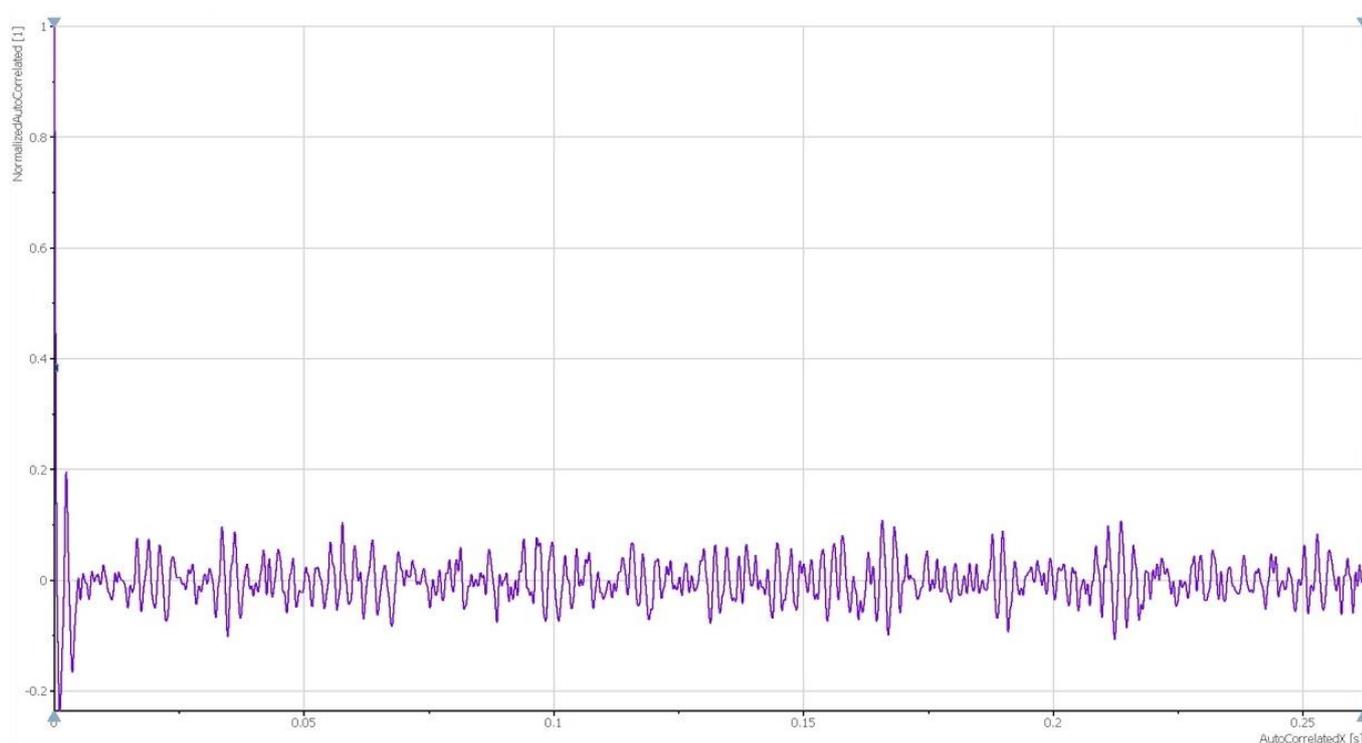


Рисунок 5.10 – Корреляционная функция при $\tau_{лз1}=0,245$ мс

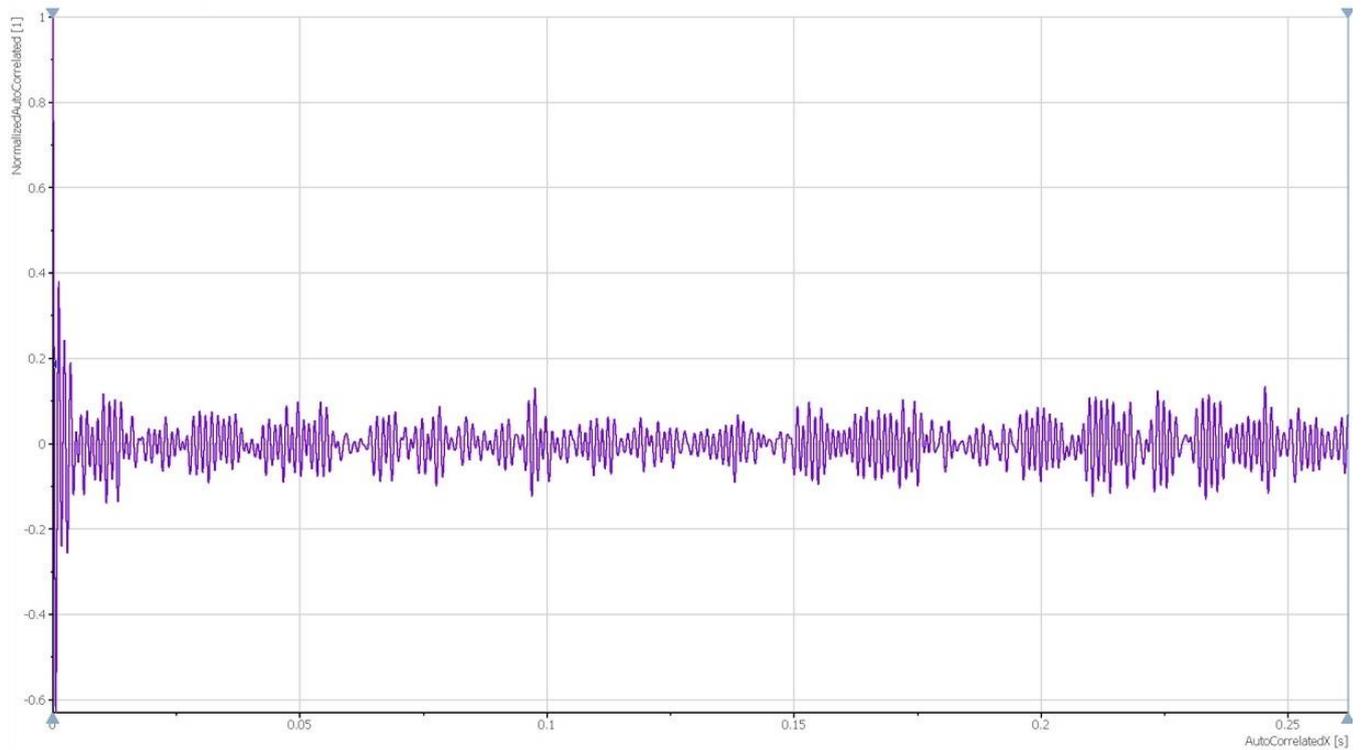


Рисунок 5.11 – Корреляционная функция при $\tau_{\text{ЛЗ1}}=0,305$ мс

Увеличение времени задержки приводит к увеличению времени корреляции хаотических колебаний в цепи обратной связи.

Взаимнокорреляционная функция двух хаотических сигналов представлено на рисунке 5.12.

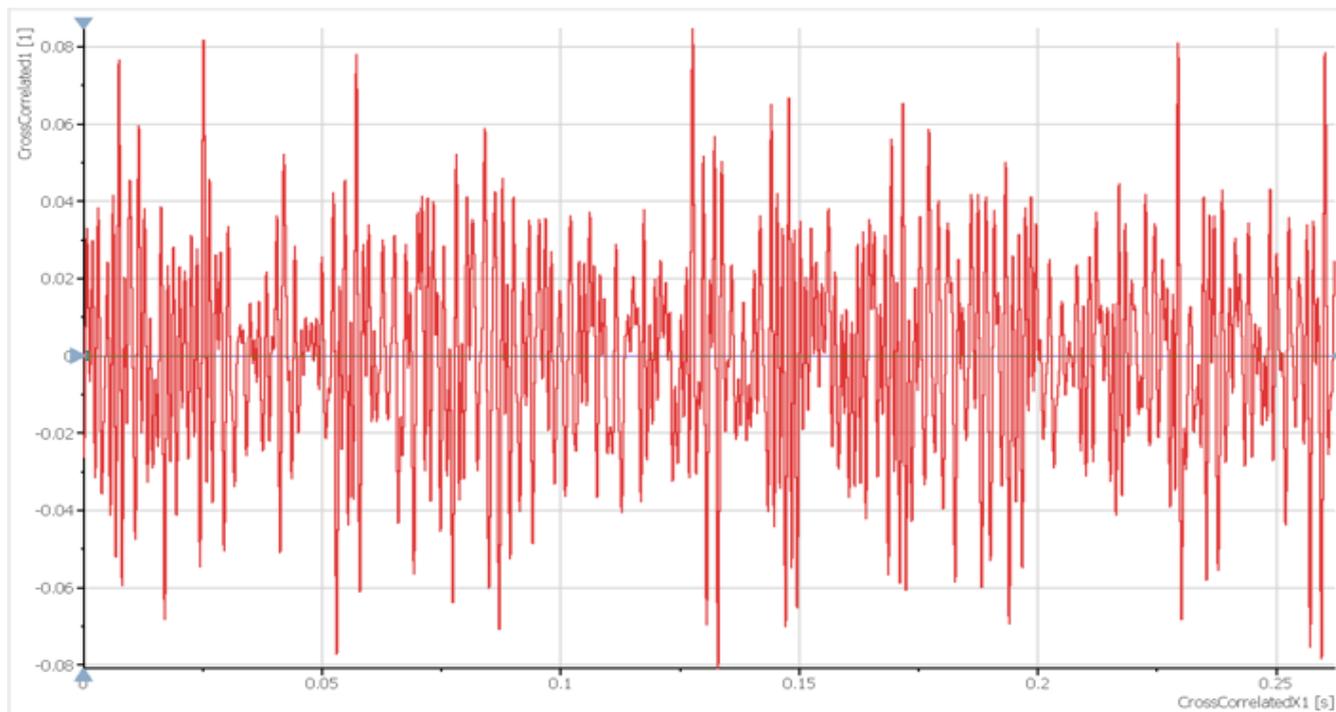


Рисунок 5.12 – Взаимнокорреляционная функция двух сигналов

Полные энергетический спектр двух сигналов при $\tau_{ЛЗ1}=0,245$ [мс] и $\tau_{ЛЗ2}=0,305$ [мс] представлен на рисунке 5.13.

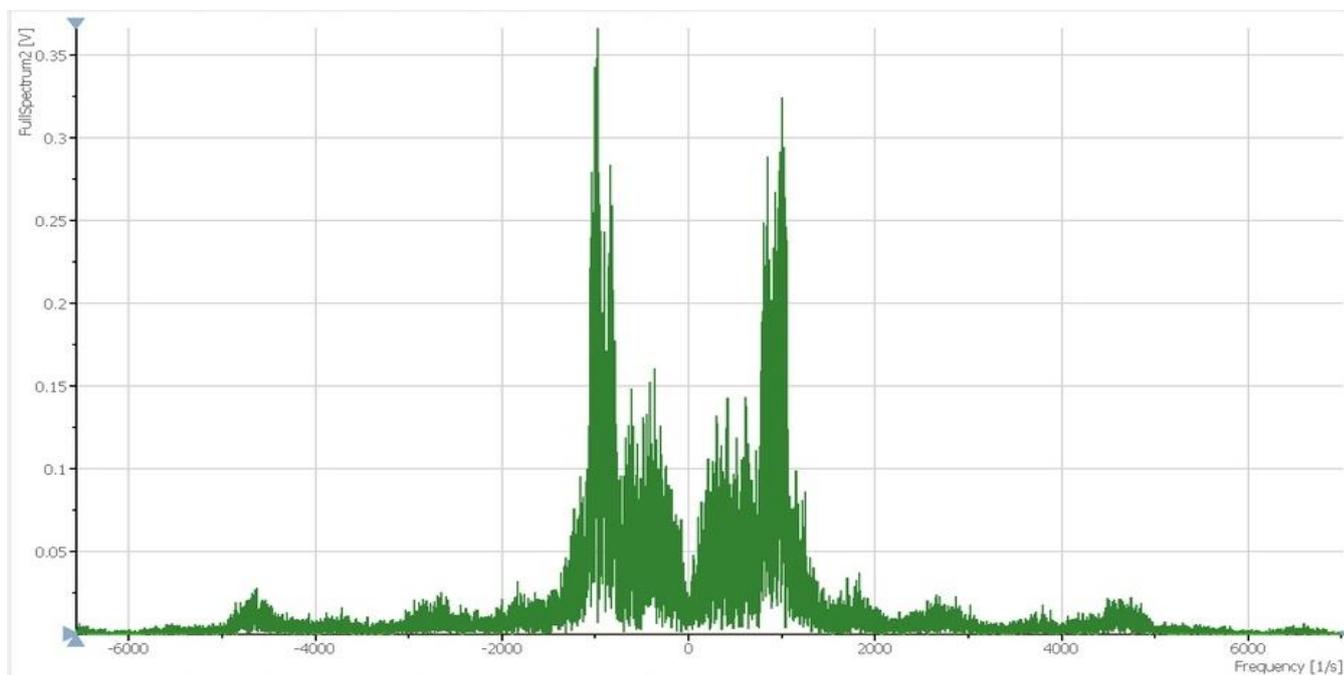


Рисунок 5.13 – Полный энергетический спектр хаотических сигналов при $\tau_{ЛЗ1}=0,245$ мс и $\tau_{ЛЗ2}=0,305$ мс

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

45

Таким образом, многократно изменяя значение постоянной времени линии задержки и увеличивая точность измерений, можно было наблюдать зарождение хаотических колебаний при том критическом значении, когда начинает проявляться так называемый «эффект бабочки», при котором малейшее изменение постоянной времени переводит генератор из одного режима работы в другой. Поэтому режим хаотических колебаний может представлять интерес для приложений, например для использования в качестве несущих в широкополосных системах связи.

6.1 Измерение ширины спектра хаотического сигнала

Для теоретического описания и расчета сигналов необходимо составить аналитическое выражение, т.е. получить математическую модель исследуемого сигнала. Это необходимо для того, чтобы сравнивать сигналы между собой.

Математическая модель может быть выражена через аналитические выражения, а также в виде компьютерной модели.

Если математическое описание типовых детерминированных сигналов, как, например, видеоимпульсов и их последовательностей, сигналов трапецеидальных и треугольной формы, биполярных сигналов прямоугольной формы – не вызывают определенных трудностей, то описание хаотических сигналов является довольно сложной процедурой, особенно для новых проектируемых динамических систем.

Для определения ширины спектра хаотического сигнала воспользуемся методом измерения X дБ.

Данный метод заключается в том, чтобы привести максимальное значение спектральной составляющей к нормализованному виду, взятый за 0 дБ. Затем нижний пороговый уровень спектра ограничить на уровне минус 40 дБ, т.е. взять 1% от максимальной амплитуды составляющей.

Нормирование сигнала N_1 производится через дополнительный блок усиления S , на выходе которого формируется сигнал NS , спектральная

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

характеристика которого изображена на рисунке 6.1 . Для примера был выбран хаотический сигнал при $\tau_{лз1}=0,245$ мс.

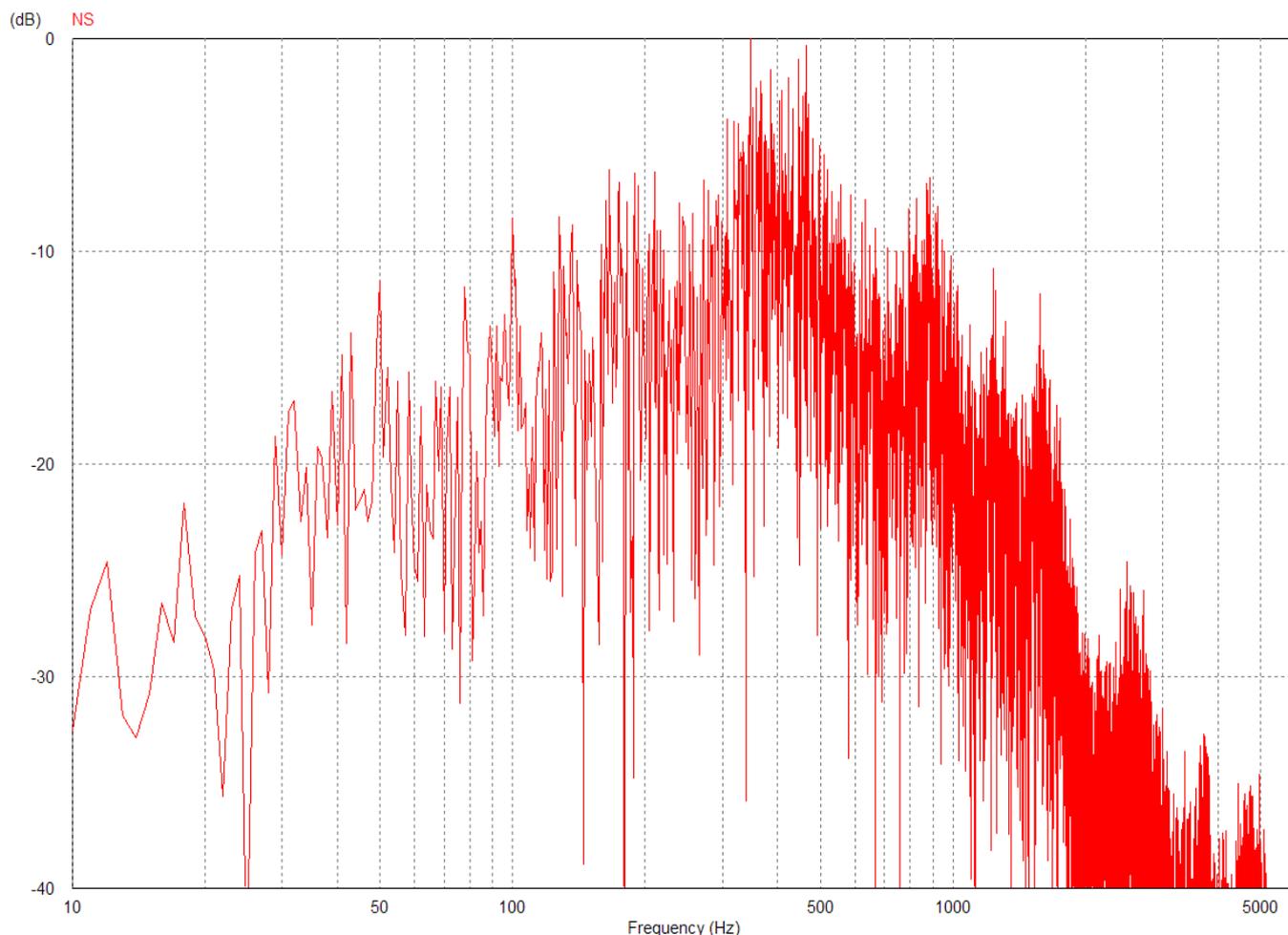


Рисунок 6.1 – Спектральная характеристика нормированного хаотического сигнала при $\tau_{лз1}=0,245$ мс

При резонансной частоте колебательной системы $f_0 = 1$ кГц нижняя граница спектра $f_{min1} = 0,1$ кГц, а верхняя $f_{max1} = 3$ кГц.

Прделаем ту же самую процедуру для хаотического сигнала , выбрав время задержки $\tau_{лз2}=0,305$ мс. Нормированный спектр изображен на рисунке 6.2.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

47

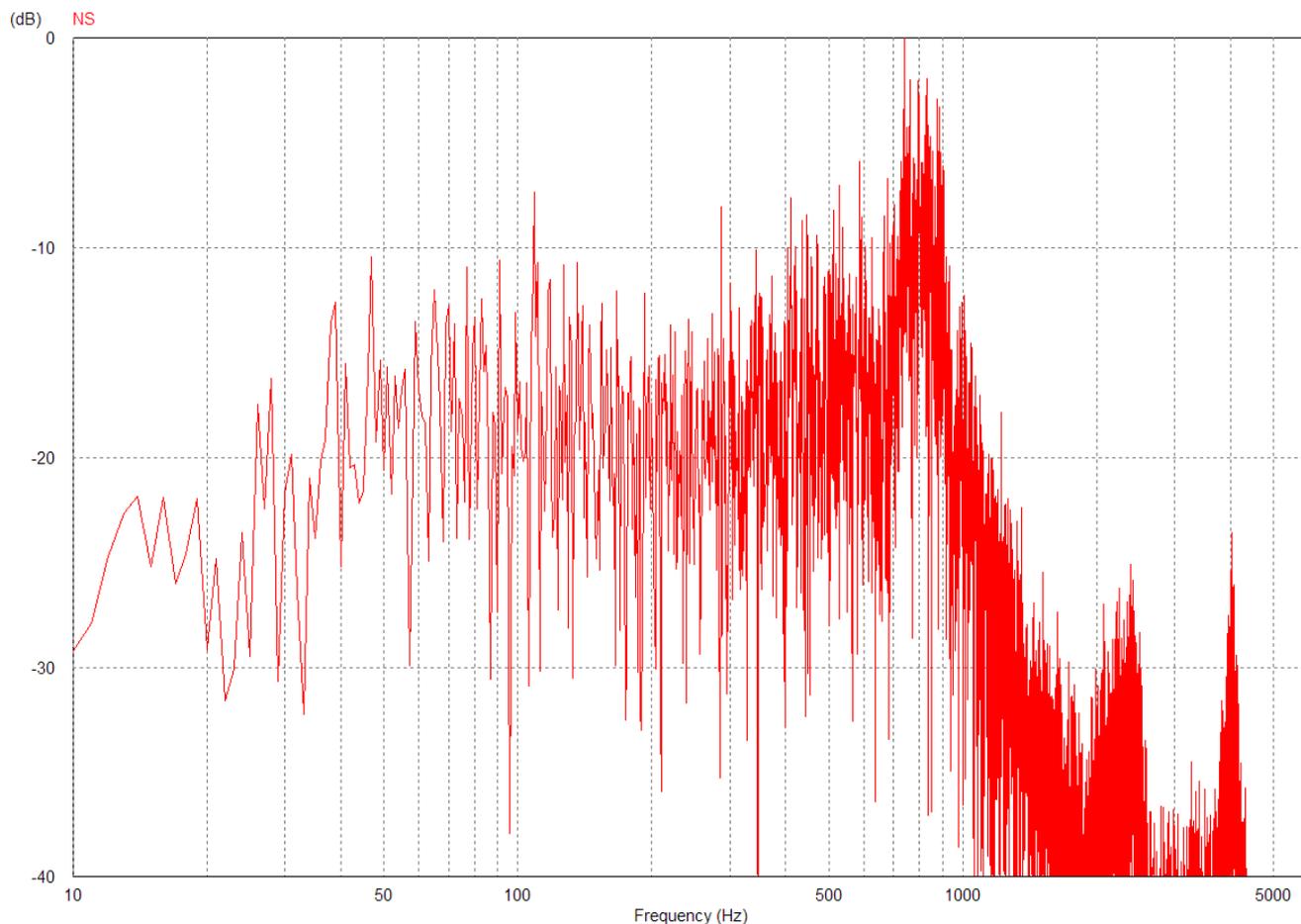


Рисунок 6.2 – Спектральная характеристика нормированного хаотического сигнала при $\tau_{лз2}=0,305$ мс

В данном случае граница спектра $f_{\min 2} = 0,1$ кГц, а верхняя граница спектра $f_{\max 2} = 4$ кГц.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

БР-02069964-11.03.02-11-19

Лист

48

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка генераторов хаотических колебаний является весьма перспективной и актуальной задачей, поскольку передача информации с помощью управляемого динамического хаоса открываются новые возможности при создании защищенных систем скрытой передачи.

В данной работе было установлено, что предлагаемый генератор можно переводить в режим сложных хаотических колебаний. Было показано, что при незначительном изменении одного из параметров генератора демонстрируются различные сценарии перехода к хаосу.

С помощью программной среды PSIM–9, представляющего собой удобное и популярное современное средство схемотехнического моделирования был смоделирован генератор хаотических колебаний. Построение корреляционных и взаимнокорреляционных характеристик хаотических колебаний производилось в среде DIAdem 2018.

Определенно, что при увеличении времени задержки основная область спектра хаотического сигнала смещается в область более высоких частот, при постоянном коэффициенте усиления колебательной системы.

Для изучения общих закономерностей нелинейной динамики в системах с запаздывающей обратной связью предлагаемый генератор является удобным устройством.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Шахтарин Б. И. Генераторы хаотических колебаний / Б.И. Шахтарин, П.И. Кобылкина, Ю.А. Сидоркина, А.В. Кондратьев, С.В. Митин. – М.: Гелиос АРВ, 2007. – 248 с.

2 Дмитриев А. С. Динамический хаос. Новые носители информации для систем связи / А. С. Дмитриев, А. И. Панас. – М: Физматлит. – 2002. – 252 с.

3 Шарыпов О. В. Детерминированный хаос и случайность – 2001. [Электронный ресурс] Режим доступа:

<http://filosof.historic.ru/books/item/f00/s00/z0000242T> (дата обращения 16.04.2019)

4 Анищенко В. С. Детерминированный хаос / В. С. Анищенко // Соросовский образовательный журнал №6. – Саратов, 1997. – С. 70–76.

5 Anichchenko V. Stochastic self-sustained oscillations of nonautonomous system / V. Anichchenko, T. Vadivasova, G. Strelkova // European Physical Journal. 2010. – Том 187 – С. 109–125.

6 Шахтарин Б. И. Моделирование дискретных генераторов хаотических колебаний / Б. И. Шахтарин, Ю. А. Сидоркина // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2011. – С. 15–24.

7 Сечение Пуанкаре [Электронный ресурс] Режим доступа:

<http://sgtnd.narod.ru/dictionary/rus/poincare.htm> (дата обращения 22.04.2019)

8 Дубровин В. С. О возможности применения фазового фильтра первого порядка в управляемом генераторе хаотических колебаний / В. С. Дубровин // Южно-сибирский научный вестник. – Бийск, 2012. – № 2 (2). – С. 16–20.

9 Дубровин В. С. Управляемый генератор хаотических колебаний для систем скрытой передачи / В. С. Дубровин // В сборнике: Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. Материалы II международной научно-практической конференции, посвящённой 105-летию со дня рождения адмирала флота СССР дважды героя Советского Союза Сергея Георгиевича Горшкова. – 2018. – С. 135–140.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

10 Пат. 2506692 Российская Федерация, МПК7 Н 03 В 27/00. Управляемый генератор / Дубровин В.С. ; заявитель и патентообладатель Дубровин Виктор Степанович. – № 2012137334/08 ; заявл. 31.08.12 ; опубл. 10.02.14, Бюл. № 4. – 15 с. : 11 ил.

11 Дубровин В.С. Генератор с быстрой перестройкой частоты для систем скрытой передачи / В.С. Дубровин, В.В. Никулин // В сборнике: Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию со дня рождения выдающегося учёного, академика АН СССР (РАН) В.С. Авдуевского. –2017. – С. 94–99.

12 Кузнецов С. П. Простые электронные генераторы хаоса и их схемотехническое моделирование / С. П. Кузнецов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. – С. 35–61.

13 Баранов С. В. Хаос в фазовой динамике осциллятора Ван–дер–Поля с модулированной добротностью и дополнительной запаздывающей обратной связью // Детерминированный хаос / С. В. Баранов, С. П. Кузнецов, В. И. Пономаренко: Изв. Вузов «ПНД», т. 18, №1, 2010. – С. 11–23.

14 Homburg A. J. Bifurcation Theory – 2006. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровая_линия_задержки (дата обращения 20.03.2019)

15 Цифровая линия задержки [Электронный ресурс] Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Цифровая_линия_задержки (дата обращения 20.03.2019)

16 Тупицына А. И. Методы компьютерного моделирования физических процессов и сложных систем / А. И. Тупицына // Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО. – 2014. – 48 с.

17 Васильев А. С. Основы программирования в среде LabVIEW / А. С. Васильев, О. Ю. Лашманова // Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 2015. – 80 с.

					БР-02069964-11.03.02-11-19	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

18 Шегал А. А. Применение программного комплекса Multisim для проектирования устройств на микроконтроллерах / А. А. Шегал. – Екатеринбург: Изд-во Урал , ун-та, 2014. – 114 с.

19 Зайцев А. А. Моделирование цифровых устройств в среде схемотехнического анализа MicroCap 9 / А. А. Зайцев. – Самара, 2011. – 50 с.

20 Возможности Electronics Workbench [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://bourabai.ru/toe/1/1-1.htm> (дата обращения 23.03.2019)

21 Официальный сайт PSIM [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://powersimtech.com/products/psim/> (дата обращения 22.03.2019)

22 DIAdem. Начало работы с DIAdem [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://training-labview.ru/templates/standard/opencore/scormDIAdemStart/> (дата обращения 22.03.2019)

					БР-02069964-11.03.02-11-19	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		52

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

о бакалаврской работе

выпускника института электроники и светотехники

Лебедева Максима Алексеевича

Тема бакалаврской работы «Разработка управляемого генератора хаотических колебаний с транспортным запаздыванием для систем защищенной связи».

Бакалаврская работа Лебедева М. А. выполнена в полном соответствии с заданием и предоставлена к заданному сроку.

В первой главе изложены основные понятия и свойства детерминированного хаоса. Во второй главе рассмотрен и описан генератор хаотических колебаний, с применением в цепи обратной связи транспортной линии задержки. В третьей главе была построена модель генератор хаотических колебаний; построены временные, спектральные и корреляционные характеристики, а также фазовые портреты хаотических сигналов при различных временах задержки. Было доказано, что при незначительных изменениях одного из параметров генератора можно было наблюдать качественный переход в хаотический режим.

Актуальность темы заключается в том, что исследуется возможность создания генератора хаотических колебаний и их применения в системах защищенной связи. Благодаря свойствам таких генераторов, как: способность в одном устройстве реализовать большое количество различных динамических режимов; большая информационная ёмкость; обеспечение конфиденциальности при передаче сообщений, позволяют надеяться на

широкое применение динамического хаоса в системах связи (системах передачи данных).

Бакалаврская работа заслуживает высокой оценки. При решении поставленных задач автор проявил себя ответственным, заинтересованным и самостоятельным студентом, способным самостоятельно решать достаточно сложные технические вопросы, показав при этом высокий уровень подготовки в области физики, математики, теории связи. Студент Лебедев М. А. заслуживает присвоения квалификации бакалавр по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Научный руководитель
канд. техн. наук, доцент



Дубровин В. С.