

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Реализация электронного устройства, демонстрирующего
гиперболический аттрактор**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4-го курса 421-й группы

направления 03.03.03 «Радиофизика» факультета нелинейных процессов

Махонина Алексея Алексеевича

Научный руководитель
Доцент КЭКиВ

М.И. Перченко

подпись, дата

Заведующий КЭКиВ,
член-корреспондент
РАН, доктор
физико-математических наук,
профессор

Д.И. Трубецков

подпись, дата

Саратов, 2017 г.

1. Введение

В 60-70-х годах 20-го века математики открыли различные гиперболические хаотические аттракторы, например, соленоид Смейла-Вильямса (см., например, [3], [4], [5]). Данные аттракторы имели по своей природе свойство грубости; считалось, что подобные гиперболические аттракторы смогут служить для описания процессов турбулентности и хаоса, однако впоследствии оказалось, что аттракторы большинства хаотических систем не попадают в этот класс, из-за чего исследование гиперболических аттракторов было на время приостановлено. Структурная устойчивость, однако, была очень весомым преимуществом для использования систем с гиперболическими хаотическими аттракторами в качестве криптографических систем, систем для скрытой коммуникации, а также для шумовой локации.

1.1. Описание задач

Задачи дипломной работы:

1. Собрать лабораторную установку, основываясь на схеме, предложенной С.П. Кузнецовым в [1].
2. Обеспечить её работоспособность.
3. Получить с её помощью фазовый портрет колебательного процесса.
4. Обработать полученные реализации и выяснить, удовлетворяют ли они косвенным признакам существования аттрактора Смейла-Вильямса.

1.2. Теоретические сведения

Аттрактор Смейла-Вильямса (соленоид Смейла-Вильямса) показан на рисунке 1.1; он относится к гиперболическим аттракторам.

Аттрактор — компактное подмножество фазового пространства динамической системы, все траектории из некоторой окрестности которого (бассейна аттрактора) стремятся к нему при времени, стремящемся к бесконечности. Термин "гиперболичность" используется потому, что изображенные на плоскости фазовые траектории вблизи седла локально имеют вид гипербол. Если аттрактор гиперболический, это означает, что среди показателей Ляпунова¹ для траекторий, проходящих через каждую точку аттрактора, есть хотя бы один положительный, т.е. в аттракторе существуют хотя бы две сколь угодно близкие точки, не лежащие на

¹ Если представить себе набор начальных условий, заполняющий в фазовом пространстве сферу радиуса R , то траектории хаотического движения, начинающиеся в этой сфере, отобразят ее на эллипсоид, большая полуось которого растёт как $d = R \cdot e^{Lt}$, где постоянная L — показатель Ляпунова. Для регулярных движений $L \leq 0$, а в хаотических режимах $L > 0$.

одной траектории, через которые проходят такие две траектории, которые экспоненциально расходятся и равномерно перемешиваются, создавая хаос.

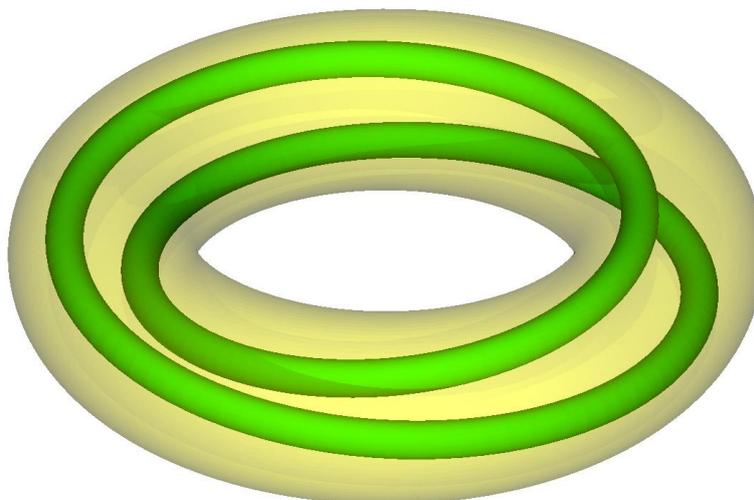


Рисунок 1.1. Аттрактор Смейла-Вильямса (соленоид Смейла-Вильямса)

В своей работе [1] С.П. Кузнецов теоретически разработал схему (см. рисунок 1.3) устройства, демонстрирующего аттрактор Смейла-Вильямса.

Основываясь на определённом поведении, наблюдаемом при работе данной схемы, можно говорить о демонстрации ею гиперболического аттрактора. Например, на рисунке 1.4 показано основное условие для корректной работы схемы, а на рисунке 1.5 показан главный косвенный признак существования гиперболического аттрактора. На рисунке 1.4 показаны графики зависимости напряжения от времени для конденсаторов C1 и C2 в двух колебательных контурах исходной схемы.

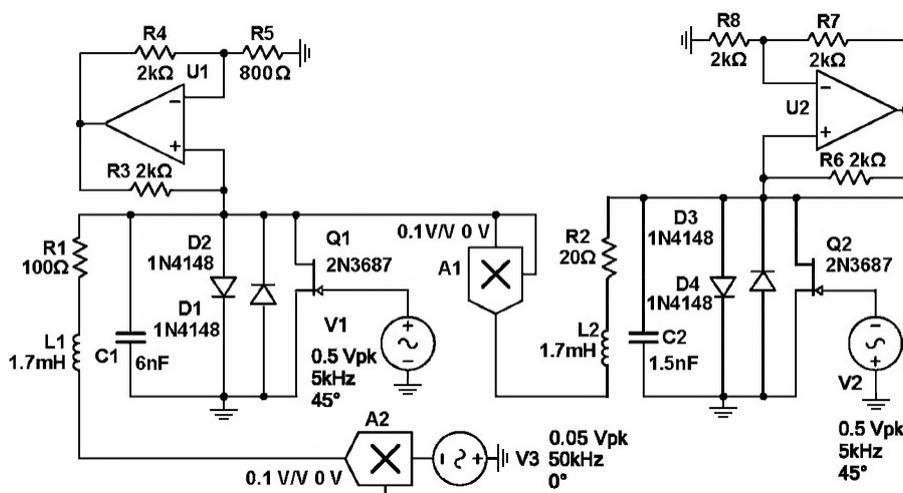


Рисунок 1.3. Схема установки, реализованная С.П. Кузнецовым в среде Multisim [1]

Условием работы установки является существование колебаний в одном контуре в те моменты времени, когда в другом контуре колебания отсутствуют, причём каждый контур в конце своего периода колебаний даёт начальное возбуждение колебаниям в другом контуре; отношение частот колебаний в обоих контурах примерно равно 2:1. (В [1] отношение частот составляет точно 2:1 — 100 кГц и 50 кГц, — однако в ходе беседы с автором тот отметил, что такие значения частот были выбраны для удобства, и точное соотношение выдерживать не требуется. Кроме того, как будет показано далее, при значениях добротностей контуров реализованной установки соотношение частот может варьироваться в больших диапазонах без нарушения работы установки.)



Рисунок 1.4. Напряжения на конденсаторах С1 и С2 [1]

На рисунке 1.5 слева показан фазовый портрет системы, который должен наблюдаться при корректной работе установки. Считается, что именно такой фазовый портрет является свидетельством наличия гиперболического аттрактора: после стробоскопирования такого фазового портрета виден аттрактор Смейла-Вильямса (на рисунке 1.5 справа).

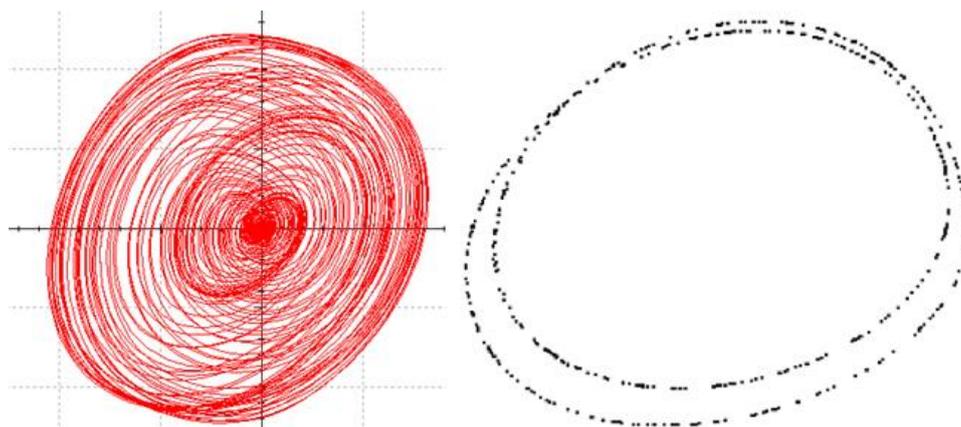


Рисунок 1.5. Характерный фазовый портрет системы [1]. По оси абсцисс отложено напряжение на конденсаторе С1, по оси ординат -- напряжение на резисторе R1

Ранее попытка реализовать такую установку была предпринята выпускником 2014-го года Д. Баклановым, однако его работа не могла быть использована в качестве основы для дальнейшей реализации экспериментальной установки потому, что в

своей работе он существенно изменил оригинальную схему и не добился положительных практических результатов; практическую пользу имел лишь вывод о питании схемы: стало ясно, что взамен используемых батарей типа 6F22 нужно создать устройство, позволяющее использовать общественную электрическую сеть.

2. Первая часть работы

2.1. Биполярный источник питания – описать необходимость

Для обеспечения долговременной работы установки без изменения параметров питания был собран биполярный источник питания, способный преобразовывать переменный ток из общественной электрической сети в постоянный ток более низкого напряжения. Его подробное описание не представляется необходимым, поэтому его конструкция будет описана лишь в общих чертах. Биполярный источник питания смонтирован на единой панели и состоит из трансформатора, диодного моста и двух конденсаторов. При значении напряжения 220 В в общественной электрической сети такой источник обеспечивает разность потенциалов до 40 В. Такого значения вполне достаточно для работы установки, критическим напряжением для которой является 30-35 В (работа установки при большем значении напряжения не проверялась, однако, учитывая параметры использованных компонентов, можно полагать, что дальнейшее увеличение напряжения питания небезопасно).

2.2. Сборка двух колебательных контуров и установка диодов

Для сборки установки была выбрана монтажная плата. Такой выбор обусловлен тем, что необходимо часто заменять компоненты схемы, менять их местами, а также менять способы их соединения между собой.

После сборки и проверки биполярного источника питания на монтажной плате вокруг операционного усилителя были собраны два простейших колебательных контура (резистор — катушка индуктивности — конденсатор), обеспечена их работоспособность и подобрано соотношение частот, близкое к 2:1: частота колебаний в первом контуре составила 176 кГц, во втором — 86 кГц; ниже будет объяснено, почему представляется возможным использовать контура с неточным соблюдением отношения частот колебаний. (Далее для краткости первый контур будет называться высокочастотным, а второй — низкочастотным.)

Сборка двух колебательных контуров была важна потому, что без них невозможна работа установки и, что важнее на начальных этапах, нецелесообразен монтаж остальных компонентов: было трудно предсказать, каких размеров в итоге достигнут все части схемы, поэтому было решено идти от малого к большому. Дальнейшая работа показала, что такой подход был правильным: к примеру, в ходе работы пришлось десятки раз менять (на монтажной плате) конфигурацию колебательных контуров; дважды потребовалось разобрать и собрать отдельно каждый контур на новом месте. Таким образом, получив устойчивые колебания нужных параметров в обоих колебательных контурах, стало возможно двигаться дальше.

Затем были установлены диоды согласно схеме С.П. Кузнецова. Не удалось подобрать диоды, которые бы одинаково ограничивали амплитуду колебаний и сверху, и снизу (разница составляет единицы милливольт); предполагается, однако, что это несущественно. В настоящий момент диоды убраны, поскольку необходимо было увеличить сигнал на выходах обоих умножителей; возможно, диоды излишни в реальной установке, в отличие от среды Multisim.

2.3. Подбор транзисторов

Наибольшие трудности возникли при установке транзисторов. Вначале использовались полевые транзисторы согласно оригинальной схеме С.П. Кузнецова, однако их работа не соответствовала ожиданиям: колебания практически прекращались, их амплитуда сильно уменьшалась; было потрачено много времени на поиск неисправностей, однако никаких недочётов выявлено не было. Замена полевых транзисторов на новые также не дала результатов.

Было решено отказаться от полевых транзисторов в пользу биполярных, закупленных ранее Д. Баклановым. После установки таких транзисторов в схему были получены требуемые картины колебаний. Причины такого поведения неясны: вначале токи и напряжения питания установки соответствовали рекомендованным для полевых транзисторов, затем параметры питания менялись в широких диапазонах, однако ни при каких значениях напряжения не наблюдалось корректной работы установки (после этого проверялась работа полевых транзисторов – ни один не был испорчен); биполярные же транзисторы не вполне соответствуют данной схеме и не должны обеспечивать её работу, однако на практике именно они позволяют получить требуемые колебания. В дальнейшем планируется исследовать эту проблему.

2.4. Генератор и инвертор

В оригинальной схеме С.П. Кузнецова используются три генератора, однако ввиду доступности лишь двух было решено переработать схему под имеющиеся. Доработка облегчается тем, что два из трёх генераторов должны давать одинаковые амплитуды и частоты, причём их колебания должны находиться в противофазе, поэтому было решено установить инвертор для инвертирования колебаний одного генератора.

Инвертор был собран на операционном усилителе. Было установлено, что такая схема позволяет при подаче на вход сигнала с генератора получить на выходе колебания, находящиеся в противофазе с сигналом (иными словами, инвертор работает как усилитель частоты с коэффициентом усиления -1); таким образом, была обеспечена замена трёх генераторов двумя.

После установки генератора и инвертора их сигналы были поданы на базы транзисторов обоих контуров, и оказалось, что колебания в них модулируются подаваемыми сигналами нужным образом.

2.5. Умножитель А1

После обеспечения работы большей части установки (без монтажа умножителей и последнего генератора) был установлен умножитель А1, на два входа которого подаются колебания из низкочастотного контура, а с выхода полученный сигнал направляется в высокочастотный контур.

Вначале умножитель был установлен согласно оригинальной схеме С.П. Кузнецова (сигнал с выхода умножителя подаётся на конец катушки индуктивности, не соединённый с колебательным контуром), однако при подключении умножителя таким образом колебаний в контуре не наблюдалось. Было решено произвести подключение следующим образом: подключить катушку индуктивности параллельно конденсатору (как было изначально), а сигнал с умножителя подавать через резистор на соединение колебательного контура с операционным усилителем. При такой конфигурации требуемые колебания наблюдались.

2.6. Установка умножителя А2 и последнего генератора

Был установлен умножитель А2, на входы которого подаются колебания из высокочастотного контура и сигнал с генератора, а получаемый сигнал подаётся в через резистор в низкочастотный контур.

Оказалось, что подаваемый сигнал практически не навязывает свою фазу колебаниям в низкочастотном контуре. В настоящее время подбираются параметры схемы, которые позволили бы наблюдать такую модуляцию: величины сопротивлений, амплитуды и т.п.

На рисунке 2.1 показаны колебания, существующие в двух контурах; на рисунке 2.2 показан фазовый портрет системы, наблюдаемый в настоящее время.

Приведённый на рисунке 2.2 фазовый портрет имеет дискретную конфигурацию из-за ограничений используемого цифрового осциллографа: через отдельные точки на экране на самом деле проходят замкнутые траектории.

Видно, что осциллограммы напряжений на конденсаторах, приведённые на рисунке 2.1, и фазовый портрет системы, приведённый на рисунке 2.2, качественно совпадают с результатами моделирования оригинальной схемы С.П. Кузнецова, приведёнными на рисунках 1.4 и 1.5 соответственно. Незначительные выбросы

объясняются нестабильностями питания, а также малым входным сопротивлением осциллографа.

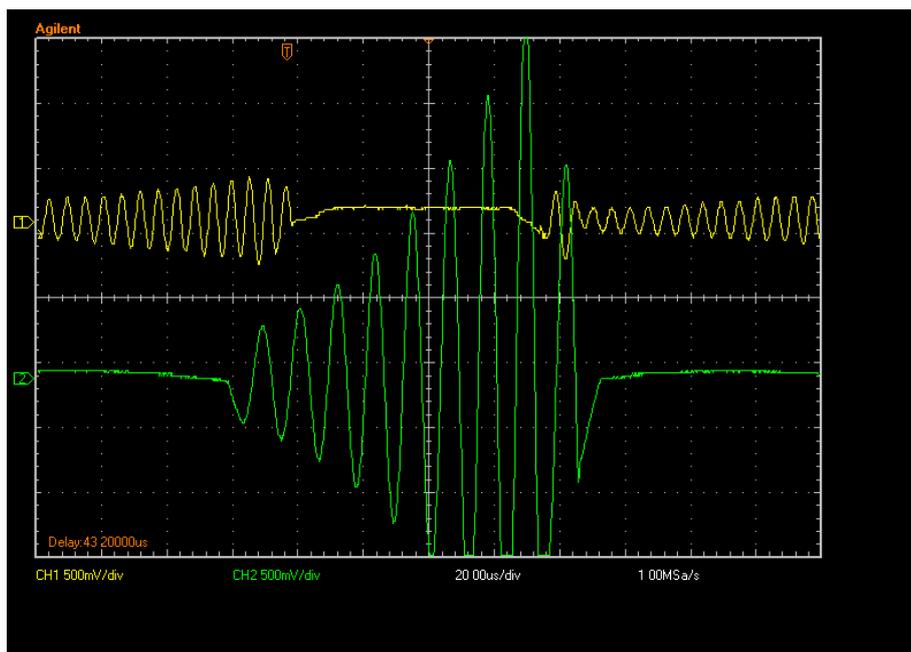


Рисунок 2.1 Колебания, существующие в двух контурах. Зелёная осциллограмма соответствует низкочастотному контуру (напряжение на конденсаторе C1), жёлтая — высокочастотному (напряжение на конденсаторе C2)

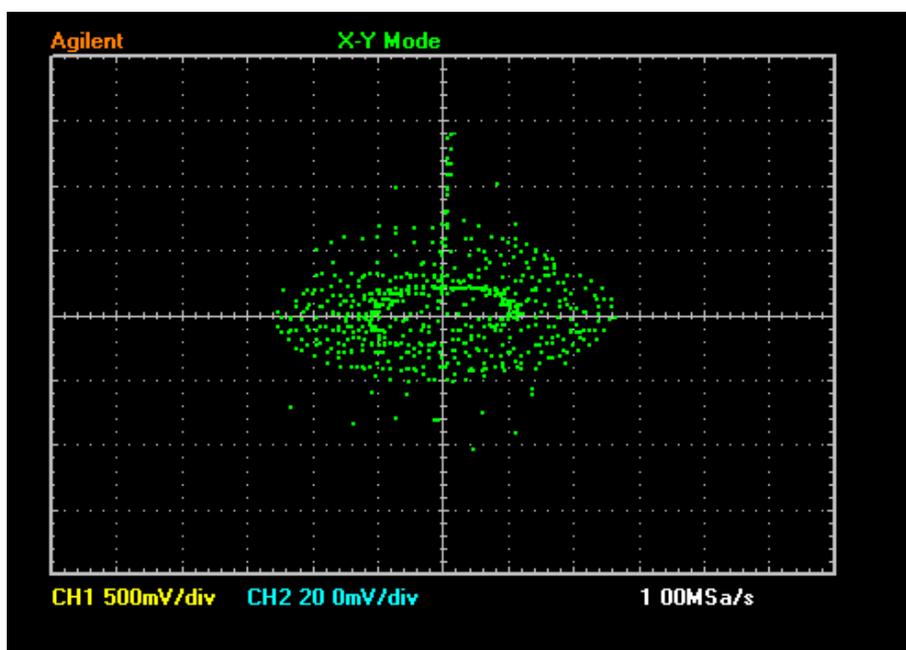


Рисунок 2.2. Фазовый портрет системы, наблюдаемый на экране цифрового осциллографа

4. Заключение

Задачи выпускной квалификационной работы выполнены.

1. Собрана лабораторная установка, соответствующая схеме, предложенной С.П. Кузнецовым в [1].
2. Обеспечена работоспособность установки.
3. Получить с её помощью необходимые реализации, с помощью которых можно установить соответствие некоторым косвенным критериям наличия соленоида Смейла-Вильямса.
4. Обработать полученные реализации и установить, насколько такие реализации удовлетворяют критериям существования аттрактора Смейла-Вильямса.

5. Источники

1. С.П. Кузнецов. Динамический хаос и гиперболические аттракторы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2013.
2. Д. Бакланов. Выпускная квалификационная работа, 2014.