

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Модификация и исследование электронной схемы с целью  
наблюдения гиперболического аттрактора**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студентки 4 курса 421 группы  
направления 03.03.03 Радиофизика  
Факультета нелинейных процессов  
Бичан Евгении Игоревны

Научный руководитель  
доцент кафедры электроники,  
колебаний и волн

Перченко М.И.

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

Трубецков Д.И.

Саратов 2019 год

## ВВЕДЕНИЕ

Хаотическая природа динамики на однородно гиперболических аттракторах была безупречно математически обоснована. Но оставленным надолго и непояснённым оказался вопрос о возможности указать физические системы, хаотическая динамика в которых была бы обусловлена присутствием именно однородно гиперболических аттракторов. Ряд исследований провел С. П. Кузнецов, которому удалось предложить электрическую схему, реализованную им в программной среде Multisim. В совместной работе Кузнецова С. П. и Селезнева Е. П. в 2006 году представлена реальная электрическая схема, демонстрирующая однородно гиперболический аттрактор. Студентами Баклановым Д. В. и годом позже Махониным А. А. [2] на монтажной плате без распайки элементов была собрана электрическая схема для исследования динамики на предмет наличия однородно гиперболического аттрактора. Эта схема функционировала на более высоких частотах, нежели представленная в работе Кузнецова С. П. и Селезнева Е. П. В ней наблюдались качественно правильные временные диаграммы, которые, однако, не подтвердили наличие однородно гиперболического аттрактора по графическому критерию зависимости фаз, разделенных периодом НЧ модулятора.

В данной выпускной работе требовалось устранить очевидные недостатки этой схемы, провести исследование для обнаружения области параметров, отвечающих однородно гиперболическому аттрактору.

В связи с этим были сформулированы следующие цели и задачи работы:

1. Монтаж электронной схемы на плате с распайкой элементов.
2. Исследование этой схемы на предмет наличия в ней гиперболического аттрактора.

Перед выполнением выпускной работы стояло несколько задач:

1. Подбор монтажной платы, планировка распределения деталей, распайка элементов схемы на плате.
2. Тестирование отдельных узлов электронной схемы.

3. Сборка полной схемы с дополнительными устройствами и апробирование работы данной схемы.
4. Составление программы для расчета и построения графической зависимости фаз колебательного процесса для оценки удовлетворения критерию существования гиперболического аттрактора; поиск численных значений регулируемых элементов схемы и режимов работы дополнительных устройств с целью нахождения динамики работы схемы, демонстрирующей однородно гиперболический аттрактор.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО АТТРАКТОРА. ПРИНЦИП РАБОТЫ СХЕМЫ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙ ГИПЕРБОЛИЧЕСКИЙ АТТРАКТОР

Однородно гиперболический аттрактор — это притягивающее инвариантное множество, расположенное в ограниченной области в фазовом пространстве диссипативной системы и составленное исключительно из однородно гиперболических седловых траекторий, причем локально вблизи всех этих траекторий фазовое пространство устроено однотипно.

Аттрактор Смейла-Вильямса — один из типичных представителей однородно гиперболических аттракторов. Такой аттрактор существует в диссипативной динамической системе, которую можно получить, в частности, отображая область аттрактора в трехмерном фазовом пространстве само в себя.

Принципиальная схема электрической установки, реализующей соленоид Смейла-Вильямса, была теоретически разработана С.П. Кузнецовым [1] и исследована им в среде «Multisim». Эта схема показана на рис. 1. В схеме частоты в НЧ ( $L_1, C_1$ ) и ВЧ ( $L_2, C_2$ ) контурах равны соответственно 50 кГц и 100 кГц.

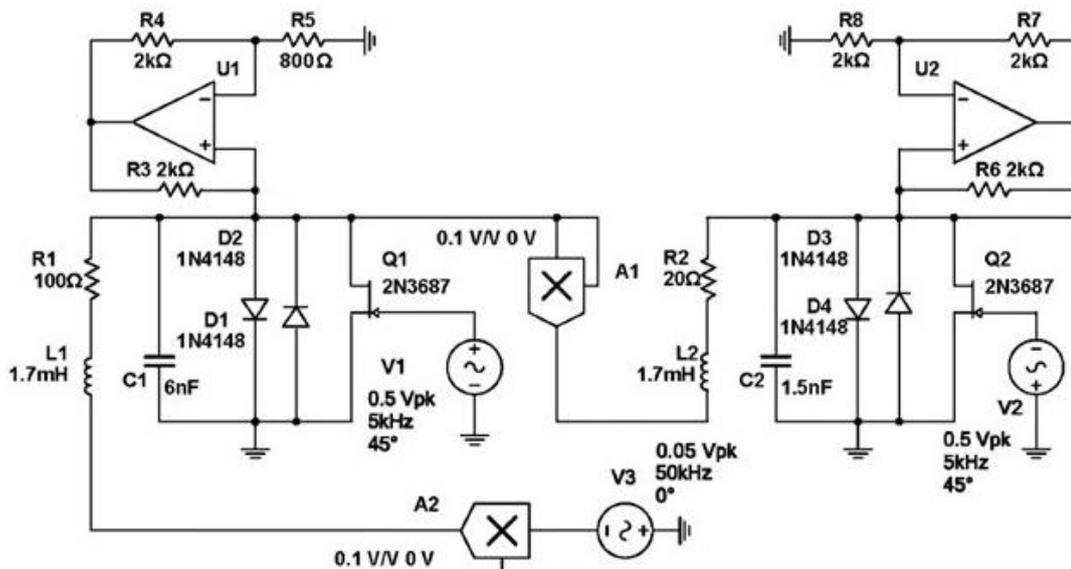


Рисунок 1. Оригинальная схема установки, которая демонстрирует гиперболический аттрактор — соленоид Смейла—Вильямса. Схема была предложена и описана С.П. Кузнецовым в работе [1]; рисунок приведён в главе 19.2.1 на странице 377

Схема состоит из двух колебательных контуров — осцилляторов ван дер Поля; первый образован катушкой индуктивности  $L_1$  и конденсатором  $C_1$ , второй —

катушкой индуктивности  $L_2$  и конденсатором  $C_2$ . Величины собственных частот двух контуров относятся как 1:2; их значения составляют 50 КГц и 100 кГц соответственно. В каждый контур вносится отрицательное сопротивление с помощью операционных усилителей  $U_1$  и  $U_2$  для поддержания незатухающих колебаний. С помощью двух пар параллельно соединённых диодов  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  и  $D_4$ , установленных в обоих контурах, вносится нелинейная проводимость, дающая увеличение потерь энергии в обоих контурах по определенному закону при возрастании амплитуды колебаний. Транзисторы  $Q_1$  и  $Q_2$  обеспечивают попеременное существование колебаний в контурах за счет подачи в противофазе низкочастотных напряжений (5 кГц) генераторами  $V_1$  и  $V_2$  на управляющие электроды транзисторов.

Напряжение с ёмкости  $C_1$  первого колебательного контура подается на умножитель  $A_1$ , выходной сигнал с которого пропорционален квадрату входного напряжения и содержит удвоенные частоту и начальную фазу колебаний первого контура. Окончание колебательного процесса в первом контуре и начало его во втором имеют некоторое временное перекрытие, за счет которого через умножитель  $A_1$  «навязывается» фаза колебаний во втором контуре. Этим обеспечивается удвоение фазы колебаний второго контура на очередном циклическом этапе его возбуждения.

Второй колебательный контур действует на первый через умножитель  $A_2$ , смешивающий входной и вспомогательный сигнал на частоте 50 кГц от генератора  $V_2$ . При этом составляющая, которая появляется на разностной частоте с начальной фазой, вдвое большей начальной фазы предшествующего цикла колебаний, действует на первый контур и стимулирует в нём начало генерации с удвоенной начальной фазой относительно начальной фазы предыдущего цикла колебаний.

## МОНТАЖ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Выбор размеров монтажной платы определялся возможностью свободного расположения элементов с учетом новых дополнительных компонентов и легкого доступа к регулируемым элементам схемы. Необходимость дополнительных компонентов определялась желанием иметь возможность как можно более тщательной настройки схемы с помощью регулируемых элементов. Эти новые элементы включают в себя:

1. Два операционных усилителя с регулируемыми коэффициентами усиления: один - после умножителя U6, другой – после умножителя U7 (рис.2).
2. Конденсатор после переменного сопротивления R13 (рис. 2) для того, чтобы убрать постоянную составляющую напряжения, возникающую после преобразования сигнала в умножителе U7 (рис. 2), которая, предположительно, влияет на колебания в высокочастотном контуре. Однако установка конденсатора привела к искажению временных характеристик, из-за чего от него отказались. Вместо этого на катушку индуктивности ВЧ контура была «подмотана» сверху катушка связи, посредством которой наводились колебания в ВЧ контуре в соответствующей фазе. При этом наличие постоянной составляющей на выходе умножителя никак не влияло на колебательный процесс в ВЧ контуре. Для симметрии возбуждения колебаний в обоих контурах аналогичная катушка была установлена на индуктивности НЧ контура, чем разрывалась гальваническая связь между выходом смесителя U6 (рис. 2) и НЧ контуром.
3. Для регулировки величины сигналов, подаваемых в низкочастотный и высокочастотный контуры, были введены в схему переменные сопротивления R1, R5, R10, R13, R14, R16, R17 (рис. 2).

На рис. 2 приведена электрическая схема, соответствующая рис. 3 (выполнена в программной среде Multisim).

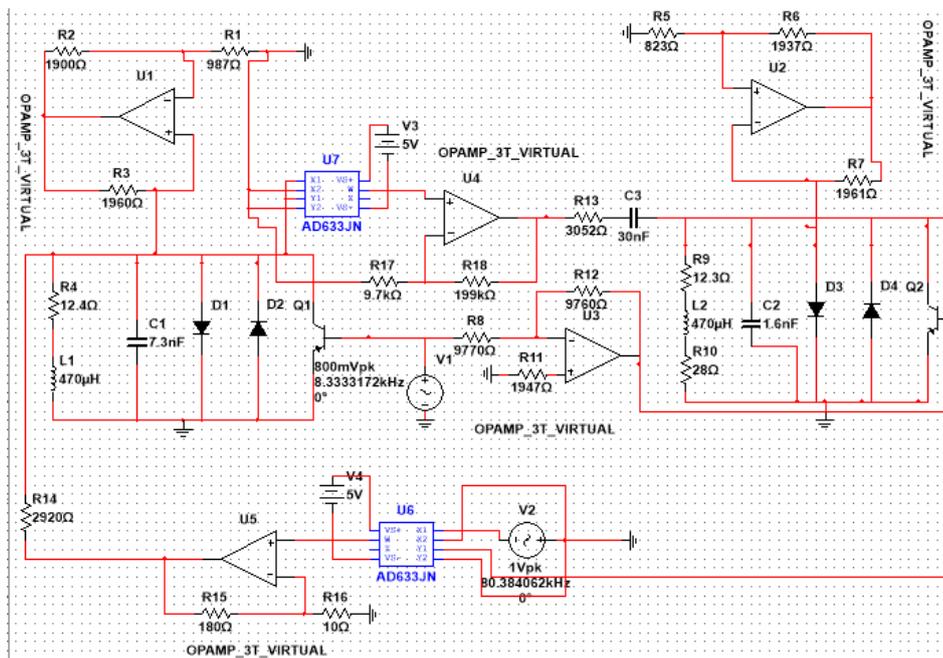


Рисунок 2. Окончательная схема, выполненная в программной среде Multisim

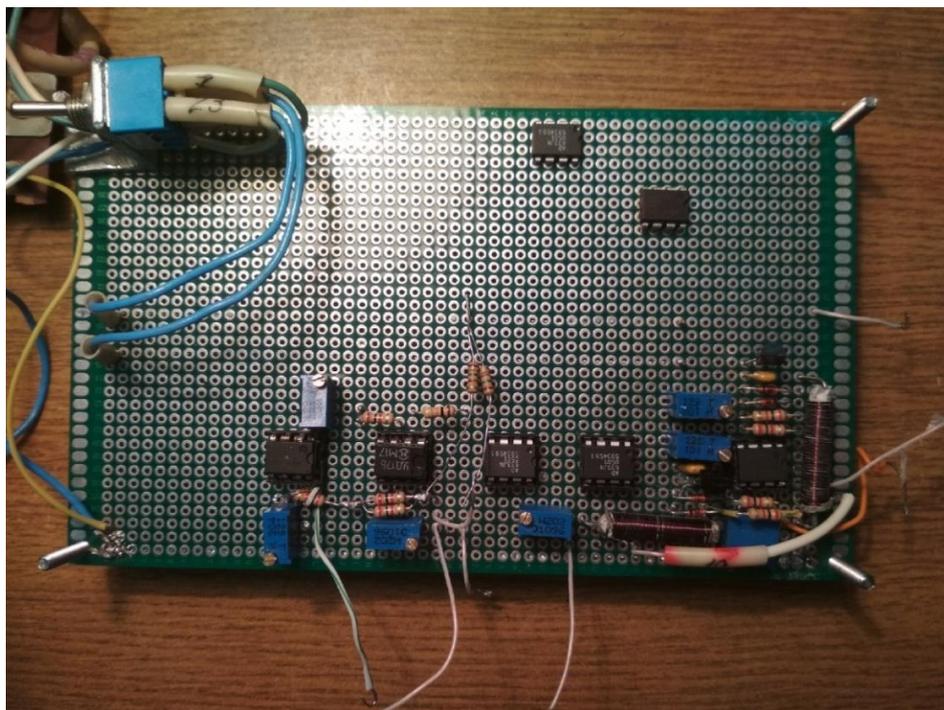


Рисунок 3. Реальная схема: вид сверху

## НАСТРОЙКА СХЕМЫ

Для настройки схемы использовался двухканальный цифровой осциллограф, на каждый из каналов которого подавалось напряжение с любой точки схемы.

Настройка схемы предполагает установку частот колебаний НЧ и ВЧ контуров в соотношении 1:2, а также установку частот между ВЧ и НЧ генераторами, которая, согласно теории должна быть целочисленная. В частности, у меня соотношение составляло 1:10.

Удачная, с точки зрения одного из критериев на гиперболичность аттрактора, настройка схемы наблюдалась при следующих значениях параметров схемы:

напряжение биполярного источника питания =  $\pm 5,56(57)$  В;

частота генератора ВЧ = 86,779700 кГц, амплитуда = 430 мВ;

частота генератора НЧ = 8,677902 кГц, амплитуда = 600 мВ.

Окончательная настройка схемы предполагает нахождение критерия, при удовлетворении которого схема будет считаться правильно функционирующей. В качестве такого критерия было выбрано внешнее сходство осциллограмм колебательных процессов, приведенных в работе Кузнецова С. П., Селезнёва Е. П. [3], и в нашей схеме.

Одна из типичных временных осциллограмм колебательных процессов в контурах приведена на рис. 4.

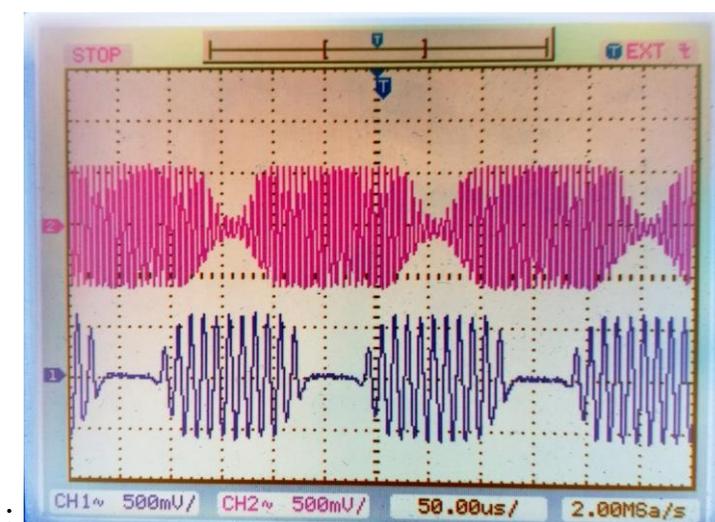


Рисунок 4. Временные зависимости напряжений в низкочастотном и высокочастотном контурах

**ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА И ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИЧЕСКОЙ  
ЗАВИСИМОСТИ ФАЗ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА.  
ИТЕРАЦИОННАЯ ДИАГРАММА**

Мною в среде Mathcad была составлена программа для расчета и построения графической зависимости фаз колебательного процесса. Ниже представлен фрагмент этой программы:

$$a := \text{READLN} ("Uc4.txt")$$

$$b := \text{READLN} (Ur4.txt)$$

$$k := 0..length(a) - 1$$

$$skva := [\sum_k(a_k)]^2$$

$$skvb := [\sum_k(b_k)]^2$$

$$a1 := a \cdot \sqrt{\frac{skvb}{skva}}$$

$$b1 := b$$

$$c1 := a1 + b1 \cdot i$$

$$j := 0..\frac{length(a) - 1 - 74}{576}$$

$$c_j := c1_{74+j \cdot 576}$$

В этом фрагменте использован следующий алгоритм:

1. Берется сумма квадратов чисел в обоих рядах (переменные skva и skvb).
2. Каждое из чисел первого ряда умножается на корень из отношения суммы квадратов чисел второго ряда к сумме квадратов чисел первого столбика. Второй же ряд значений остается неизменным.
3. Из полученных значений первого и второго ряда создаются комплексные числа, реальная часть которых – это числа первого ряда, а мнимая часть – числа второго ряда.

Из нового ряда комплексных чисел выбираются нужные значения через определенный период, считаются аргументы этих значений и строится график

зависимости значения последующего аргумента от значения предыдущего аргумента ( $\varphi(n+1)$  от  $\varphi(n)$ ).

На начальном этапе я считала необходимым построение не менее трех диаграмм для приближенного определения характера рассчитанных кривых по соответствию или несоответствию тангенса угла наклона этих кривых числу 2 (что следует из теоретических построений).

Ниже приведен график по данным трёх осциллограмм (осциллограммы «снимались» при «правильных» значениях параметров, указанных на стр. 8, после остановки развертки осциллографа в три произвольных (но недалеких друг от друга) момента времени, записи в память осциллографа временной реализации, запуска развертки, следующей остановки, записи и т.д.; при этом установка находилась в постоянно включенном состоянии при неизменных параметрах; записанные в три ячейки памяти осциллограммы затем обрабатывались на компьютере), каждая из которых имеет 6 точек:

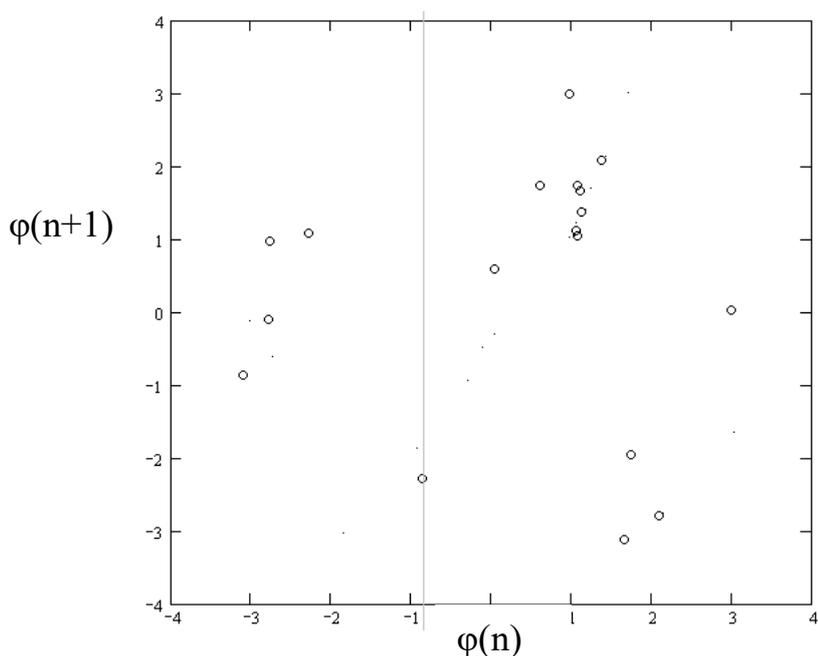


Рисунок 5. Зависимость последующей фазы от предыдущей по данным всех трех осциллограмм.

На рис. 5 видно, что точки примерно легли на три параллельных линии, коэффициент наклона которых равен приблизительно 2,05. По этому критерию

можно сделать вывод, что в нашей схеме предположительно присутствует аттрактор Смейла-Вильямса.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы было сделано следующее:

1. Предыдущая схема перенесена на новую монтажную плату с распайкой элементов, что позволило избежать нестабильности контактов между элементами, затрудняющей, а иногда и делающей невозможным исследовательскую часть работы со схемой.
2. В схему были добавлены новые регулируемые элементы, позволяющие осуществлять раздельную и тонкую настройку отдельных узлов схемы, что облегчает поиски «правильных» режимов работы схемы и трактовку наблюдаемых осциллограмм.
3. Были выработаны критерии осознанного целенаправленного последовательного выбора параметров схемы.
4. Указанным в п. 3 способом были подобраны параметры схемы, позволившие получить «правильную» итерационную диаграмму фаз, что и являлось одной из целей выпускной работы.
5. В среде Mathcad составлена программа для построения итерационной диаграммы фаз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С.П. Кузнецов «Динамический хаос и гиперболические аттракторы». – М.: Институт компьютерных исследований, 2013
2. А.Махонин Выпускная квалификационная работа, 2017
3. С.П.Кузнецов, Е.П.Селезнев, «Хаотическая динамика в физической системе со странным аттрактором типа Смейла-Вильямса», ЖЭТФ, 2006, №2