

УДК 53.087/.088; 53.072; 53.004

СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ХАОТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ С ЭЛЕКТРОННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

© 2009 г. Ю. А. Калинин, А. В. Стародубов

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования “Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского”

E-mail: StarodubovAV@nonlin.sgu.ru

Проведено экспериментальное исследование сигналов микроволнового генератора хаотических колебаний с электронной обратной связью (на основе виртуального катода). Экспериментально установлено, что микроволновые генераторы шумоподобных колебаний с электронной обратной связью обладают сверхширокой полосой генерации. Проиллюстрированы статистические свойства генерируемых сигналов. Приведены перспективные области применения рассматриваемых сверхширокополосных микроволновых источников.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из бурно развивающихся направлений развития информационно-телекоммуникационных систем в настоящее время – использование хаотических сигналов в качестве носителей информации [1, 2] в системах связи, радиолокации. Не в меньшей степени хаотические, особенно широкополосные и сверхширокополосные, сигналы востребованы при решении задач радиопротиводействия и радиоподавления [2]. Целый ряд технологических процессов [3] (например, обезвоживание, очистка и повышение качества нефти и нефтепродуктов, органический синтез с использованием поглощения СВЧ-энергии, медицинские задачи, и т.п.) также представляется перспективной областью применения подобных сигналов. Для генерации таких сигналов необходимы разработка и создание широкополосных источников хаоса, работающих в диапазоне высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот. В настоящее время наиболее перспективно использование источников широкополосных и сверхширокополосных хаотических сигналов малого и среднего уровня мощности, основанных на новых способах генерации хаотических сигналов. Например, известны генераторы хаотических колебаний [1], в которых используется тормозящее электрическое поле для создания сгустков (уплотнений плотности тока) в турбулизированном электронном пучке. Такие приборы названы низковольтными виркаторами с электронной обратной связью [1].

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ, МАКЕТА ГЕНЕРАТОРА

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования колебаний

широкополосного генератора хаоса, принцип действия которого основан на использовании интенсивного электронного пучка с электронной обратной связью. Для формирования указанной электронной обратной связи в подобных приборах используется дополнительное торможение электронного потока за счет подачи отрицательного потенциала на коллектор. На рис. 1 приведен эскиз макета низковольтного виркатора с электронной обратной связью. Для регистрации спектров мощности сигнала использовали цифровой анализатор спектра Agilent Technologies ESA-E Series Spectrum Analyzer E4402B (9.1 кГц – 3.0 ГГц). Регистрация временных реализаций генерируемых сигналов осуществлялась с использованием цифрового запоминающего осциллографа реального времени Agilent Technologies Infiniium DSO 81004B Series oscilloscopes, а также Tektronix DPO 72004 Digital Phosphor Oscilloscope Series. Питание экспериментального образца генератора хаоса на виртуальном катоде с электронной обратной связью осуществляли в импульсном режиме. Длительность импульса составила $\tau = 10$ мкс. Основные управляющие параметры задавали следующими: величина ускоряющего напряжения $U_0 = 2450$ В, напряжение на коллекторе U_k изменяли в диапазоне от -250 В до 2300 , ток пучка $I = 190$ мА. Методика проведения экспериментальных исследований была следующей. При каждом изменении величины коэффициента торможения электронного пучка регистрировали спектры мощности и временных реализаций. Коэффициент торможения электронного пучка изменяли, варьируя величины напряжения на коллекторе U_k и величины ускоряющего напряжения U_0 .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим результаты исследования полосы генерируемых частот в зависимости от такого управляющего параметра, как коэффициент торможения электронного пучка K :

$$K = 1 - \frac{U_k}{U_0},$$

где U_k – величина напряжения на коллекторе, U_0 – величина ускоряющего напряжения.

На рис. 2 приведены спектры мощности колебаний, полученные с экрана цифрового анализатора спектра E4402B Agilent Technologies при значении коэффициента торможения электронного пучка $K = 0.2$ (рис. 2а) и $K = 0.6$ (рисунок 2б). Видно, что малые величины коэффициента торможения электронного пучка приводят к генерации преимущественно узкого спектра (350 МГц) в длинноволновой части диапазона. По мере увеличения параметра K до 0.6 возрастает частота колебаний и существенно расширяется спектр колебаний. При этом полоса генерируемых частот составляет более двух октав при максимальной интегральной мощности до 3 Вт. Значительный интерес вызывает факт наличия генерации в длинноволновой части спектра: колебания с частотой менее 300 МГц. Точные границы расположения диапазона сверхвысоких частот определить трудно [4, 5], но обычно в этот диапазон включают частоты от 0.3 (либо 0.03 [5]) до 30 ГГц (либо до 3000 ГГц [5]).

Таким образом, рассматриваемый источник сверхширокополосных колебаний не только генерирует сверхвысокие частоты, но и является источником колебаний в высокочастотном диапазоне – длинноволновой части сверхвысокочастотного диапазона (колебания с частотой менее 300 МГц). Объяснить наличие высокочастотных колебаний можно следующим образом. Область пространства взаимодействия низковольтного виркатора представляет собой небольшой объем, в котором могут образовываться и накапливаться “медленные” положительные ионы. Источником положительных ионов могут выступать остаточные газы, которые ионизируются электронным потоком в процессе работы генератора. Кроме того, в результате попадания электронов на поверхности электродов также могут образовываться положительные ионы. Положительные ионы – источник релаксационных, поперечных и плазменных колебаний [6].

Интересно исследовать, как при изменении коэффициента торможения электронного пучка изменяются статистические свойства генерируемых сигналов. Для решения обозначенной выше проблемы были построены плотности распределения вероятности попадания мгновенных значений амплитуд выходного сигнала в заданный ин-

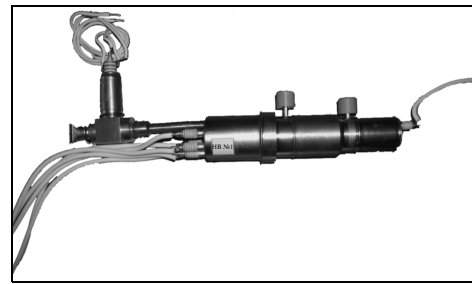


Рис. 1. Фотография лабораторного макета низковольтного виркатора с электронной обратной связью.

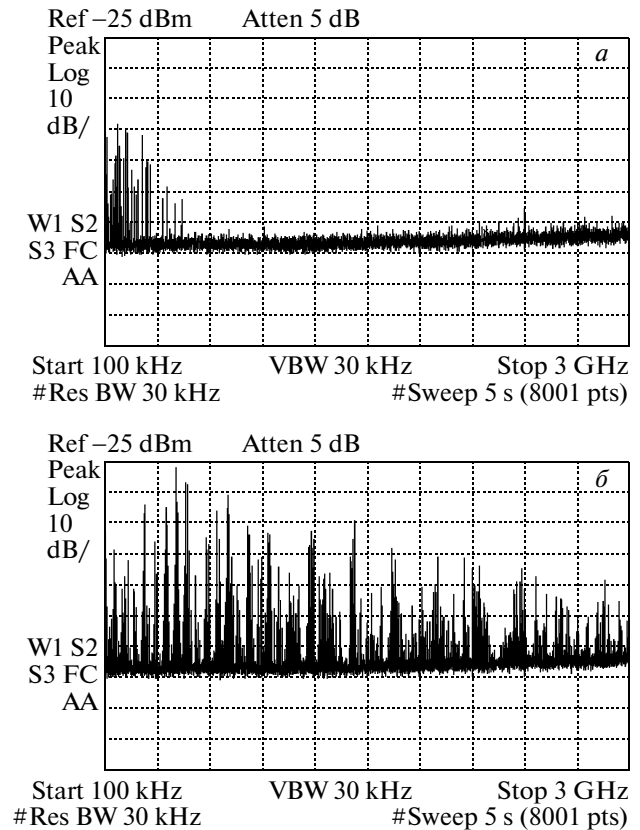


Рис. 2. Спектры мощности выходных сигналов разработанного макета генератора, полученные при различных коэффициентах торможения электронного пучка $K = 0.2$ (а), 0.6 (б).

тервал при различных значениях величины K . Построение распределения проводили следующим образом: в оцифрованной временной реализации определялся максимально возможный размах амплитуды захваченного сигнала A . По результатам проведенных экспериментов было выбрано значение $A = 0.04$ В. Далее величину A разбивали на 200 одинаковых интервалов $\Delta A = 0.0002$ В. Для каждого интервала ΔA рассчитывали количество попаданий в этот интервал мгновенного значения амплитуды сигнала, и получен-

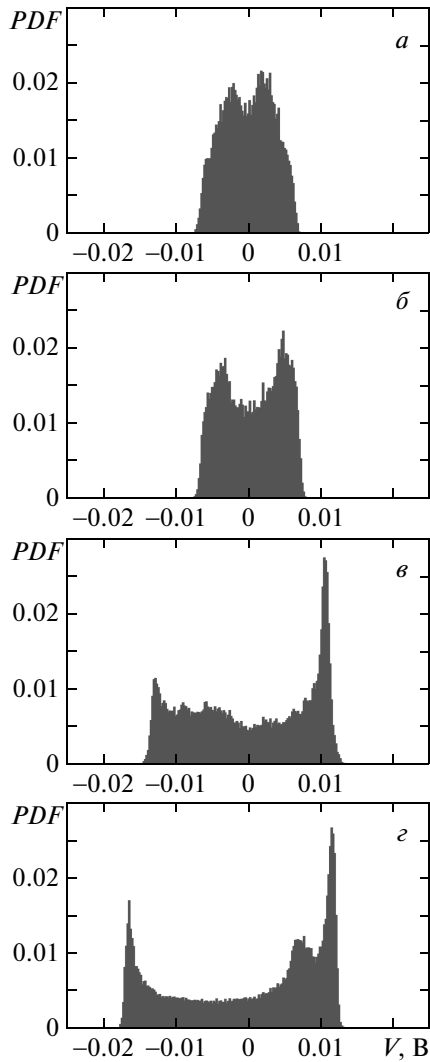


Рис. 3. Распределение плотности вероятности PDF попадания мгновенного значения амплитуды сигнала исследуемого экспериментального образца в заданный интервал значений при различных величинах коэффициента торможения электронного пучка: $K = 0.49$ (а), 0.63 (б), 0.94 (в), 1.1 (г).

ное значение нормировали на общее количество точек во временной реализации захваченного сигнала. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что при небольших значениях величины K распределение плотности вероятности мгновенных значений амплитуд сигнала имеет вид, близкий к гауссовому, или нормальному, распределению. Этот результат представлен на рис. 3а. С увеличением коэффициента торможения электронного пучка, как показано на рисунках 3б–г, распределение вероятности становится двугорбым. Таким образом, изменение коэффициента торможения электронного пучка приводит к изменению не только спектрального состава генерируемых сигналов,

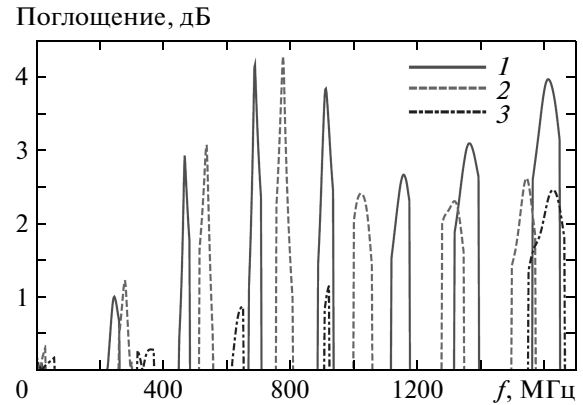


Рис. 4. Полосы частот поглощения электромагнитного излучения водонефтяными эмульсиями с различным массовым содержанием воды. Цифрам на рисунке соответствует: 1 – водонефтяная эмульсия с 50%-ным содержанием воды, 2 – с 40%-ным содержанием воды, 3 – с 30%-ным содержанием воды.

но и к существенному изменению их статистических характеристик.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обнаруженные особенности разработанных источников сверхширокополосных сигналов, а именно сверхширокая полоса генерируемых частот (более двух октав) и возможность управления статистическими характеристиками генерируемых сигналов могут найти применение прежде всего в области информационно-телекоммуникационных систем: в системах передачи информации на основе широкополосных хаотических сигналов, в системах радиоподавления и радиопротиводействия. Еще одной перспективной областью применения разрабатываемых сверхширокополосных источников может стать технология обработки нефти и водонефтяных эмульсий с использованием микроволнового излучения. В настоящее время известно несколько способов обработки нефтей с целью улучшения их физико-химических свойств: уменьшение вязкости, объемного содержания воды, солей и других примесей [7–10]. Методы воздействия ВЧ- и СВЧ-полей на водонефтяные эмульсии выделяются отдельно. Несмотря на то что исследования в этом направлении начались еще в 80-х годах прошлого века [10–12], однако на сегодняшний момент не существует объяснения, как именно происходит взаимодействие поля с компонентами эмульсии. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что наиболее эффективные диапазоны частот поглощения микроволнового излучения водонефтяными эмульсиями лежат в области частот от десятков мегагерц до гигагерца, что хорошо соотносится с данными, известными в науч-

ной литературе [7]. С использованием СВЧ-анализатора цепей E5062A Agilent Technologies проведены исследования по величине ослабления микроволнового сигнала, проходящего через коаксиальный резервуар, наполненный водонефтяными эмульсиями с различным объемным содержанием воды. Было установлено, что водонефтяным эмульсиям с меньшим объемным содержанием воды соответствуют более высокие диапазоны частот наиболее эффективного поглощения микроволнового излучения. Данный результат приведен на рис. 4. Разработанный макет вакуумного генератора с электронной обратной связью обеспечивает покрытие всех найденных эффективных диапазонов поглощения частот.

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный макет вакуумного генератора с электронной обратной связью позволяет управлять не только полосой частот генерации, изменяя режимы генерации от узкополосных (почти одночастотных) до сверхширокополосных, но и статистическими свойствами генерируемых сигналов. Области применения разработанного макета могут выступать как информационно-телекоммуникационные системы, так и технологии промышленной обработки нефти и водонефтяных эмульсий с целью улучшения качества добываемой нефти посредством ее обезвоживания и уменьшения вязкости. Авторы выражают благодарность Березину С.И. за помощь в проведении экспериментальных исследований по влиянию СВЧ-излучения на водонефтяные эмульсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям, РФФИ (проект № 09-02-00255), Президентской

программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-355.2008.2), АВЦП "Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)" (РНП 2.1.1/235), а также CRDF REC-006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитриев А.С., Панас А.И.* Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
2. *Залогин Н.Н., Кислов В.В.* Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
3. *Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электроники для физиков. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2003, 2004.
4. *В. Клеен.* Введение в электронику сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1963.
5. *Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М.* Физические основы электроники СВЧ. М.: Сов. оадио, 1971.
6. *Юрьев В.И., Ильин А.А.* // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1 Электроника. 1965. Вып. 5. С. 106.
7. *Бойков Н.М., Позднышев Г.Н., Мансуров Р.И.* Сбор и промысловая подготовка нефти, газа и воды. М.: Недра, 1981. 261 с.
8. *Антипин Ю.В. и др.* Предотвращение осложнений при добыче обводненной нефти. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1987. 168 с.
9. *Смирнов Ю.С., Мелошенко Н.Т.* // Нефт. хоз-во. 1989. № 8. С. 46.
10. *Тронов В.П.* Разрушение эмульсии при добыче нефти. М.:Недра, 1974. 271 с.
11. *Саяхов Ф.Л., Хакимов В.С., Арутюнов А.И. и др.* // Нефт. хоз-во. 1979. № 1. С. 36 .
12. *Ковалева Л.А., Миннигалимов Р.З., Зиннатуллин Р.Р.* // Об эффективности утилизации нефтяных шламов высокочастотным электромагнитным полем. Нефтегазовое дело 2008.