

УДК 621.391, 621.396

## СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ХАОТИЧЕСКИХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, С. А. Садовников, В. Н. Скороходов

Национальный исследовательский Саратовский государственный университет им.  
Н.Г. Чернышевского

Получена 18 декабря 2012 г.

**Аннотация:** Представлены схемы и основные характеристики импульсных сверхвысокочастотных генераторов хаотических радиоимпульсов для систем прямохаотической связи на основе клистронного автогенератора с полосой 30 МГц и мощностью в импульсе до 5 Вт и ЛБВ-автогенератора с полосой 3 ГГц и мощностью до 23 Вт.

**Ключевые слова:** прямохаотические системы связи, хаотический радиоимпульс, генераторы хаоса СВЧ диапазона, многорезонаторный клистрон, лампа бегущей волны, автогенераторы СВЧ хаотических радиоимпульсов, подавление хаоса в клистронном автогенераторе.

**Abstract:** This work presents schemes and basic characteristics of UHF generators of radio-impulses for chaotic signal communication systems based on klystron with 30MHz band up to 5 W power and TWT with 3GHz band up to 23 W power.

**Key words:** chaotic data transfer, chaotic impulses, UHF chaotic generators, multicavity klystron, traveling wave tube, chaos suppression in klystron autogenerators.

### Введение

В настоящее время весьма перспективны направления использования информационных технологий на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации [1]. Одним из новых направлений в системах связи является передача информации с помощью прямохаотических систем связи (ПХСС) [2]. Основным понятием в ПХСС является понятие хаотического радиоимпульса, представляющего собой фрагмент прямохаотического сигнала с длительностью, превышающей длительность квазипериода хаотических колебаний. Полоса частот такого импульса определяется полосой частот исходного хаотического сигнала, генерируемого

источником хаоса, и, что важно, в широких пределах не зависит от длительности импульса. Это существенно отличает хаотический радиоимпульс от классического, заполненного фрагментом периодической несущей, полоса частот которого зависит от его длительности. Хаотические радиоимпульсы могут использоваться для передачи информации в качестве несущих колебаний в ПХСС. ПХСС имеет целый ряд преимуществ перед традиционными системами передачи информации: стабильность спектра передаваемых широкополосных хаотических радиоимпульсов при изменении длительности этих радиоимпульсов, помехоустойчивость, высокая скорость передачи информации, возможность организации конфиденциальной связи [3]. Информация непосредственно вводится в хаотический сигнал, генерируемый в СВЧ-диапазоне путем модуляции параметров источника хаоса, а извлекается из хаотического сигнала путем его обработки без использования промежуточной частоты. Важными элементами ПХСС являются генераторы хаотических радиоимпульсов.

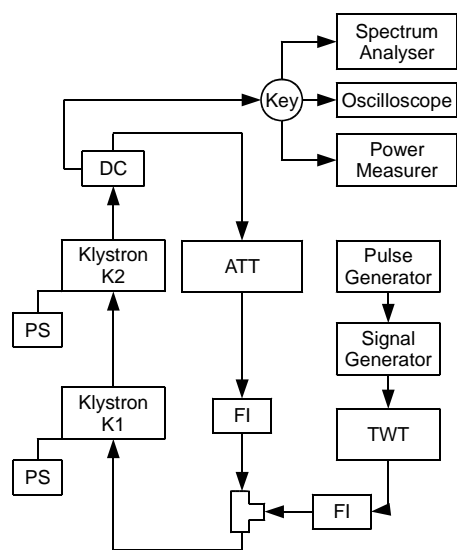
Среди известных в настоящее время генераторов хаоса СВЧ диапазона наибольшее распространение получили твердотельные генераторы, использующие в качестве активных элементов диоды и полевые транзисторы с применением микроволновой техники и нелинейной линии задержки на поверхностной магнитостатической волне [3,4]. Недостатком подобных источников хаотических радиоимпульсов является довольно низкая выходная мощность - десятки милливатт [2].

В настоящей работе приведены результаты исследований по созданию сверхвысокочастотных генераторов хаотических радиоимпульсов на основе промышленных электронных усилителей – многорезонаторных клистронов и лампы бегущей волны (ЛБВ), важным преимуществом которых является высокий уровень мощности и возможность работы в условиях электромагнитного и радиационного излучений. Эти преимущества в совокупности с достоинством ПХСС делают генераторы СВЧ хаотических радиоимпульсов на основе электровакуумных приборов перспективными для

практического использования.

## Каскадный клистронный автогенератор СВЧ хаотических радиоимпульсов

Каскадный клистронный автогенератор состоит из двух последовательно соединенных почти идентичных многорезонаторных клистронов, когда выход каждого клистрона через элементы обратной связи соединен со входом другого. При таком соединении парциальных клистронов реализуется схема со встречными электронными потоками в каскадном автогенераторе. Отдельный каскад содержит промышленный пятирезонаторный клистрон КУ-134Е десятисантиметрового диапазона длин волн среднего уровня мощности. В клистронах использованы двухззорные объемные резонаторы, работающие на противофазном виде колебаний. Для первого клистрона нагруженная добротность входного резонатора 200, выходного 125, собственная добротность 420, резонансная частота (первого и последнего резонаторов) 2798 МГц. Для второго клистрона нагруженная добротность входного резонатора 140, выходного 120, собственная добротность 400, резонансная частота 2800 МГц. Коэффициент усиления каждого клистрона в оптимальном режиме 30 дБ, выходная мощность до 20 Вт, ускоряющее напряжение до 2.5 кВ, ток электронного пучка 60 мА.



(a)



(b)

Рис. 1. Схема (a) и фото (b) установки

На рис. 1 приведены принципиальная схема и фото установки для исследования основных характеристик каскадного клистронного автогенератора хаотических радиоимпульсов. В коаксиальную линию обратной связи, соединяющей выходной резонатор одного клистрона с входным резонатором другого, через направленные ответвители (DC) включены цифровой анализатор спектра Agilent E4404, позволяющий исследовать полный спектр генерируемого сигнала, цифровой запоминающий осциллограф реального времени Agilent DSO8100 для наблюдения временной реализации и гистограммы распределения вероятностей сигналов, измеритель мощности для определения уровня генерируемой мощности, как в непрерывном, так и в импульсном режимах, поляризационный аттенюатор (АТТ), обеспечивающий изменение глубины обратной связи, ферритовые вентили (DC) и переключатель сигналов (Key). Каждый клистрон имеет автономный блок питания (PS). В качестве источника внешнего воздействия для осуществления внешней модуляции был взят генератор стандартных сигналов Г4-80, сигнал которого модулировался генератором импульсов и усиливался ЛБВ (TWT). Система внешнего воздействия через ферритовый вентиль (FI) и тройник включалась в линию обратной связи клистронов. Полное время запаздывания сигнала вдоль замкнутого кольца обратной связи с учетом длины линии обратной связи, времени пролета электронов в пространстве дрейфа клистронов и добротности объемных резонаторов обоих клистронов было измерено с помощью анализатора СВЧ цепей Agilent E5062A и оказалось равным 0.2 нс. Описанная установка позволяла исследовать основные характеристики каскадного клистрона как в непрерывном, так и в импульсном режимах при автономном и неавтономном характерах работы.

Прежде всего, необходимо было определить режимы работы каскадного клистронного автогенератора, характерные для генерации хаотических радиоимпульсов. Основной характеристикой, позволяющей определить такие режимы, является амплитудная характеристика автогенератора, описывающая зависимость выходной мощности  $P_{out}$  от входной  $P_{in}$ .

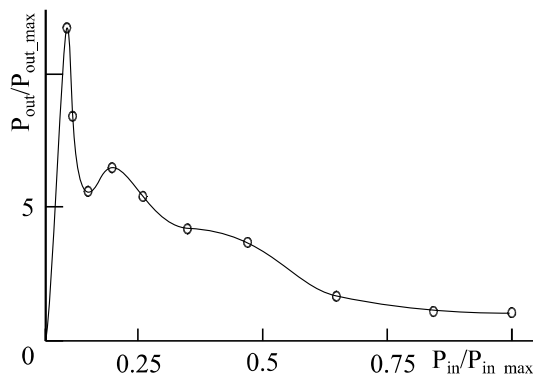


Рис. 2. Амплитудная характеристика каскадного клистронного автогенератора при токах клистронов 50 мА ( $P_{in\_max}=0.6$  W)

На рис. 2 приведена амплитудная характеристика каскадного клистронного автогенератора, характерной особенностью которой является наличие нескольких резко падающих участков, на которых возможно возбуждение колебаний в режиме развитого хаоса.

Физической причиной генерации хаотических колебаний в клистронном автогенераторе, как и в других автогенераторах [5], является наличие крутого падающего участка на амплитудной характеристике, обусловленного перегруппировкой электронного потока при значительных уровнях входного сигнала. Нелинейная перегруппировка электронов и запаздывание реакции резонансной автоколебательной системы на начало действия нелинейности и приводят к возникновению хаотических колебаний. В каскадном клистронном автогенераторе по сравнению с одиночным клистроном [6], не только раньше возбуждаются хаотические колебания, благодаря меньшему стартовому току и большему коэффициенту усиления, но и наблюдается гораздо большее количество зон хаотической генерации из-за нескольких падающих участков амплитудной характеристики [7]. Если выбрать рабочую точку на амплитудной характеристике автономного каскадного клистронного автогенератора на падающем участке, то легко получить на выходе генератора интенсивные хаотические колебания. При введении в цепь обратной связи автогенератора внешнего гармонического сигнала, подбором его частоты и амплитуды можно

добиться полного подавления хаотических колебаний и резкого падения выходной мощности клистрона из-за эффекта синхронизации [8].

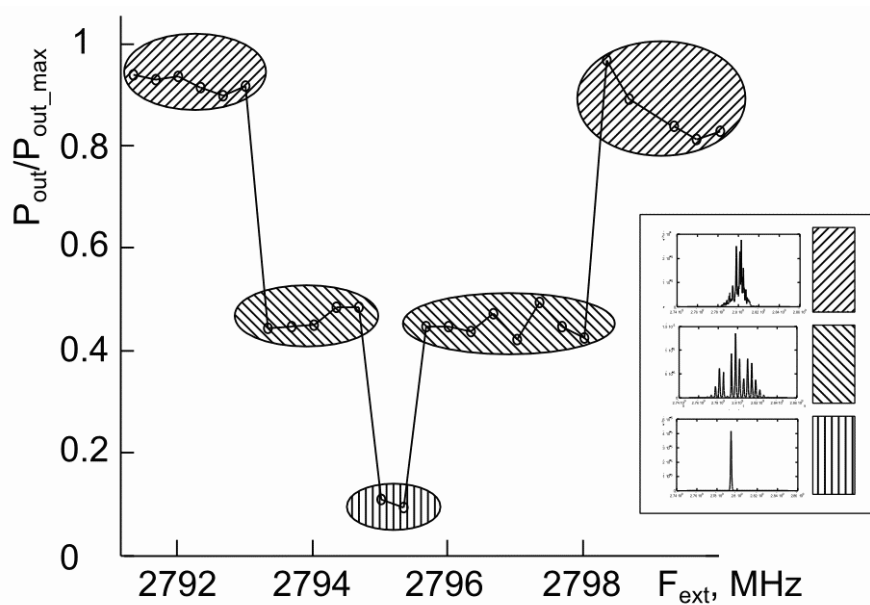


Рис. 3. Зависимость нормированной выходной мощности от частоты внешнего гармонического воздействия ( $P_{out\_max}=5$  W)

На рис. 3 приведена характерная зависимость нормированной выходной мощности, работающего в режиме развитого хаоса каскадного автогенератора от частоты внешнего гармонического воздействия  $F_{ext}$ . Здесь же показана эволюция спектра колебаний неавтономного генератора. Видно, что с увеличением частоты внешнего сигнала, воздействующего на развитый хаос клистронного автогенератора, сначала наблюдается дискретизация спектра, а затем подавление собственных хаотических колебаний и установление периодических колебаний, полностью совпадающих по частоте с частотой вынуждающего сигнала. При тщательно подобранных параметрах внешнего воздействия удастся значительно подавить сигнал в выходной секции каскадного клистронного автогенератора. Эффект подавления хаотических колебаний в каскадном клистроне, по-видимому, связан с резким возрастанием в этом режиме входной мощности второго парциального клистрона, приводящей к сильной разгруппировке электронных сгустков в плоскости

выходного резонатора этого клистрона. Поэтому эффект подавления хаоса в каскадном клистроне происходит при значительно меньшем уровне мощности гармонического сигнала по сравнению с уровнем мощности этой величины в одиночном клистронном автогенераторе.

Эффект подавления хаоса в многорезонаторном клистронном автогенераторе был использован для генерации периодической последовательности хаотических радиоимпульсов [9]. Для этого автономный клистронный автогенератор вводился в режим генерации развитого хаоса. Затем в цепь обратной связи подавались внешние СВЧ радиоимпульсы, несущая частота и амплитуда которых подбирались для получения полного подавления хаоса и резкого падения мощности в течение этих импульсов. В результате автогенератор генерировал периодическую последовательность хаотических радиоимпульсов, частота следования и длительность которых определялась внешним СВЧ радиоимпульсом. Таким же образом осуществлялась внешняя модуляция и каскадного клистронного автогенератора хаотических колебаний. Причем, между хаотическими импульсами амплитуда сопутствующего сигнала была во много раз меньше амплитуды хаотического радиоимпульса.

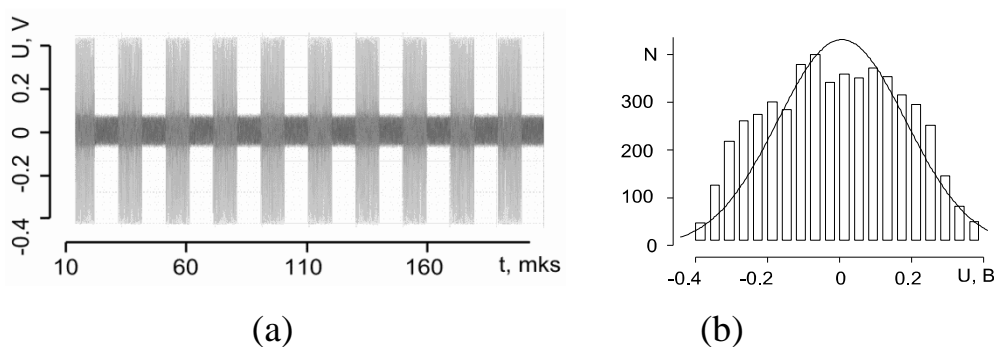


Рис. 4. Осциллограмма периодической последовательности прямоугольных импульсов (а) и гистограмма распределения вероятностей сигнала внутри хаотического импульса (б)

На рис. 4 показаны осциллограммы периодической последовательности прямоугольных импульсов, полученных описанным способом. Длительность

импульса 10 nks с интервалом между импульсами 10 nks. Пиковая мощность составляла 5 W при токах клистронов по 50 mA. Здесь же приведена гистограмма распределения вероятностей импульсного хаотического сигнала, свидетельствующая о том, что полученные хаотические колебания близки к нормальному гауссовому распределению вероятностей мгновенных значений. Отличаясь высокой мощностью, каскадный клистронный автогенератор хаотических радиоимпульсов имеет присущий резонансным приборам характерный недостаток – относительно узкую полосу частот хаотических колебаний 30 – 40 MHz.

### **Генератор сверхширокополосных СВЧ хаотических радиоимпульсов на основе лампы бегущей волны**

Главное преимущество сверхширокополосных прямохаотических систем связи по сравнению с сверхширокополосными системами, использующими сверхкороткие импульсы, является то, что их спектр мощности не зависит от длительности импульса, а потому не имеет энергетических ограничений, присущих системам с короткими импульсами. Поэтому особый интерес представляют генераторы сверхширокополосных СВЧ хаотических импульсов.

Предлагаемый генератор сверхширокополосных СВЧ хаотических радиоимпульсов был создан на основе промышленной ЛБВ среднего уровня мощности десятисантиметрового диапазона длин волн. Основные характеристики промышленного ЛБВ усилителя следующие: ускоряющее напряжение 2500 V, ток электронного пучка до 80 mA, выходная мощность до 30 W, коэффициент усиления до 30 dB, полоса частот 2300 MHz. Величина тока пучка определяется ускоряющим напряжением, а регулируется потенциалом фокусирующего электрода пушки. Фокусировка пучка осуществляется периодическим магнитным полем.

Генератор хаотических колебаний представляет собой ЛБВ, вход и выход которой замкнуты кольцом обратной связи. В отличие от описанного в работе [10] классического шумотрона, состоящего из двух соединенных в кольцо через регулируемый аттенуатор ЛБВ, в исследуемом генераторе хаотических



колебаний использовалась одна ЛБВ.

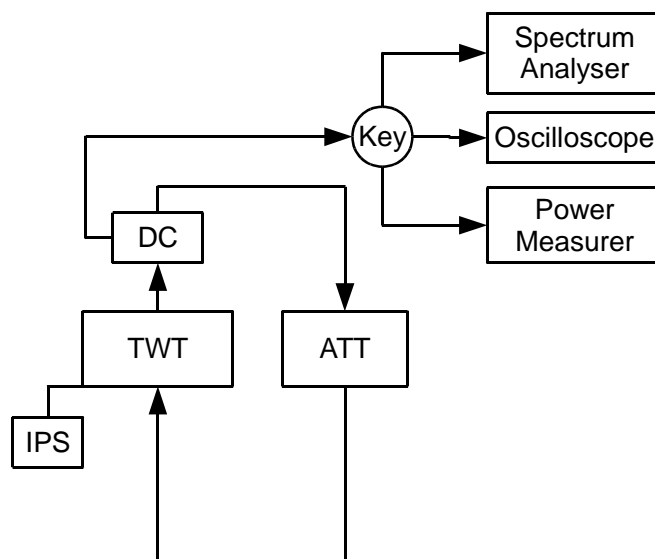


Рис. 5. Схема автогенератора хаотических радиоимпульсов на ЛБВ

На рис. 5 дана принципиальная схема для исследования основных характеристик автогенератора хаотических радиоимпульсов на ЛБВ (TWT). На выходе ЛБВ через направленный ответвитель (DC) и ключ (Key) включены анализатор спектра, осциллограф для наблюдения временной реализации и гистограмм распределения вероятностей хаотического сигнала, измеритель мощности. Глубина обратной связи менялась с помощью поляризационного аттенюатора (ATT). Периодическая последовательность хаотических радиоимпульсов в разработанном генераторе создавалась за счет подачи импульсного напряжения на замедляющую систему и коллектор ЛБВ от импульсного модулятора (IPS). Таким образом осуществлялся режим внутренней модуляции. С помощью анализатора СВЧ цепей было определено время запаздывания сигнала по кольцу обратной связи. Оно оказалась равным 0.06 нс. Основной сценарий возбуждения хаотических колебаний в ЛБВ – генераторе, как и в клистронном автогенераторе, связан с ярко выраженным падающим участком амплитудной характеристики.

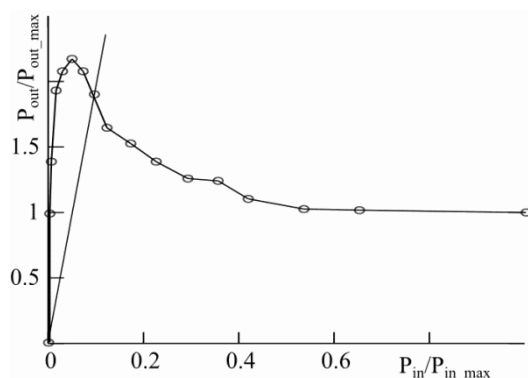


Рис. 6. Амплитудная характеристика ЛБВ – генератора при токе 50 мА  
( $P_{in\_max}=1.5$  W)

На рис. 6 приведена амплитудная характеристика ЛБВ – генератора при токе 50 мА. С помощью аттенюатора в цепи обратной связи затухание плавно уменьшалось. При некоторой величине затухания в системе возникала моногенерация, соответствующая фазовому условию возбуждения колебаний в замкнутом кольце обратной связи. При смещении рабочей точки, определяемой пересечением амплитудной характеристики с прямой обратной связи, в область падающего участка амплитудной характеристики сначала появлялась периодическая автомодуляция, а затем в системе возникал развитый хаос. На рис. 6, где представлена амплитудная характеристика ЛБВ автогенератора, показана прямая обратной связи, соответствующая режиму развитого хаоса. Полоса частот генерируемых колебаний в режиме развитого хаоса существенно увеличивается с ростом тока пучка ЛБВ.

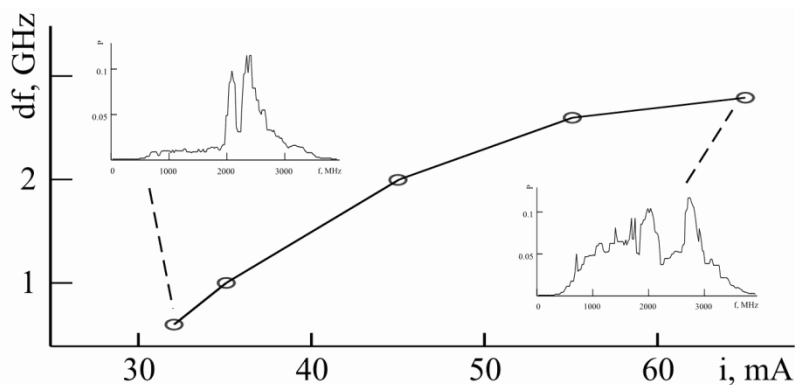


Рис. 7. Зависимость полосы частот ЛБВ – генератора по уровню -10 dB от тока электронного пучка

На рис. 7 показана зависимость этой полосы частот от тока электронного пучка по уровню -10 dB и спектры колебаний для отдельных значений тока. Спектральная характеристика ЛБВ генератора в линейном масштабе при токе 80 mA показана на рис. 8. Видно, что непрерывная полоса частот колебаний, генерируемых в режиме развитого хаоса, порядка 3000 MHz по уровню -10 dB.

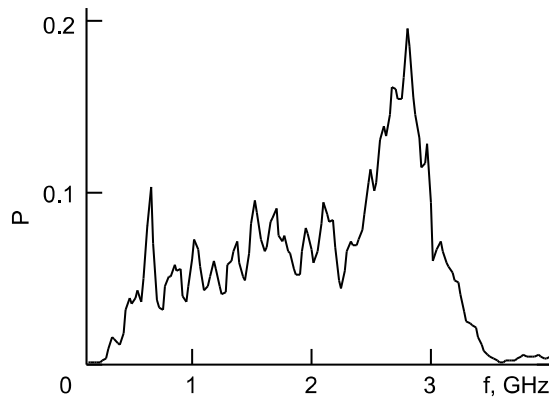


Рис. 8. Спектр хаотического сигнала ЛБВ – генератора при токе 80 mA

Осциллограмма СВЧ хаотического радиоимпульса и гистограмма распределения вероятностей приведены на рис. 9.

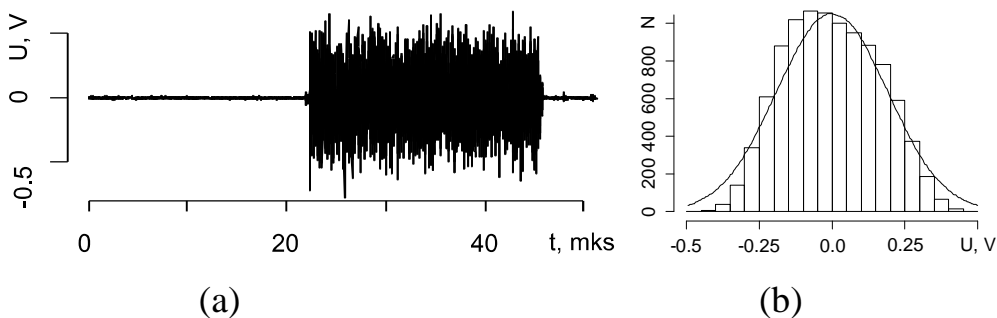


Рис. 9. Осциллограмма СВЧ хаотического радиоимпульса (a) и гистограмма распределения вероятностей импульса (b)

Здесь же показан нормальный (гауссов) характер распределения вероятностей. Можно отметить, что отличие характера распределения вероятностей импульсного хаотического сигнала от гауссова распределения незначительно. Пиковая мощность составляла 22.5 W. Импульсный модулятор

обеспечивал получение СВЧ хаотических радиоимпульсов с длительностью от 20 до 300 nks со скважностью от 10 до 200.

*Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты №11-02-00057 и №11-02-00047) и в рамках президентской программы поддержки ведущих научных школ РФ (проект №НШ-1430.2012.2).*

### **Литература**

[1] Ю. В. Гуляев, Р. В. Беляев, Г. М. Воронцов, Н. Н. Залогин, В. И. Калинин, Э. В. Кальянов, В. В. Кислов, В. Я. Кислов, В. В. Колесов, Е. А. Мясин, Е. П. Чигин. Информационные технологии на основе динамического хаоса для передачи, обработки, хранения и защиты информации. // Радиотехника и электроника, 2003г., Т.48, № 10. С. 1157-1185.

[2] А. С. Дмитриев, А. В. Клецов, А. М. Лактюшкин, А. И. Панас, С. О. Старков. Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса. // Радиотехника и электроника, 2006, Т. 5, №10, С. 193.

[3] А. С. Дмитриев, Б. Е. Кяргинский, А. И. Панас, Д. Ю. Пузиков, С. О. Старков. Сверхширокополосная прямохаотическая передача информации в СВЧ-диапазоне. // Письма в ЖТФ, 2003, Т. 29, Вып 2, С. 70.

[4] С. В. Гришин, Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, В. Н. Скороходов, Ю. П. Шараевский. Генерация хаотических СВЧ-импульсов в кольцевой системе на основе клистронного усилителя мощности и нелинейной линии задержки на магнитостатических волнах. // Письма в ЖТФ, 2010, Т. 36, Вып 2, С. 62.

[5] Н. Н. Залогин, В. В. Кислов. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. // Изд. "Радиотехника", М. 2006 г.

[6] A. M. Shigaev, V. S. Dmitriev, Yu. D. Zharkov, N. M. Ryskin. Chaotic Dynamics of Delayed Feedback Klystron Oscillator and its Control by External Signal // IEEE Transactions On Electron Devices, 2005, Vol. 52, № 5, P. 790.

[7] Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, В. Н. Скороходов, П. Ю. Семеновых, А.

А. Бирюков. Каскадный клистронный автогенератор с запаздыванием. // ЖТФ, 2005, Т. 75, Вып. 12, С. 94.

[8] Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, В. Н. Скороходов, А. М. Геншафт. Синхронизация хаотических колебаний путём подавления хаоса в клистроном автогенераторе внешним гармоническим сигналом. // Изв. вузов. «Прикладная нелинейная динамика», 2007, № 3, С. 52.

[9] Б. С. Дмитриев, Ю. Д. Жарков, В. Н. Скороходов. Способ генерации хаотических радиоимпульсов большой мощности для прямохаотических систем связи. // Патент на изобретение РФ № 2349027.2009, Бюллетень №7.

[10] В. Я. Кислов, Е. А. Мясин, Н. Н. Залогин. О нелинейной стохастизации автоколебаний в электронно-волновом генераторе с задержанной обратной связью. // Радиотехника и электроника, 1980, Т. 25, № 10, С. 2160.